



**Filipe André
Oliveira Silva**

**Otimização do processo de injeção de peças
poliméricas para automóveis utilizando o método de
elementos finitos**

Relatório de estágio apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais, realizada sob a orientação científica do Doutor Augusto Luís Barros Lopes, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro e a coorientação científica do Doutor Ricardo José Alves de Sousa, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Professora Doutora Maria Elisabete Jorge Vieira da Costa
Professora Auxiliar, Universidade de Aveiro

Professor Doutor Paulo Agostinho Silva de Lima,
Professor Adjunto, Escola Superior de Design, Gestão e Tecnologias da Produção Aveiro Norte

Professor Doutor Augusto Luís Barros Lopes
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professores Augusto Lopes e Ricardo Sousa, pelo acompanhamento no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também á empresa PRINEMO, em particular ao Engenheiro Nelson Machado, a oportunidade de realizar estágio e todo o apoio prestado na realização do trabalho. Quero também agradecer a todos os restantes colaboradores da empresa, em particular aos Engenheiros Filipe Pires e Francisco Alçada, pela disponibilidade e acompanhamento permanente.

palavras-chave

Método dos elementos finitos, moldagem por injeção, polímeros termoplásticos.

resumo

A injeção é uma das técnicas de moldagem de peças poliméricas mais utilizadas. No entanto, devido aos elevados custos do equipamento de injeção, moldes e equipamentos auxiliares, a viabilidade económica desta etapa de processamento exige uma otimização das condições de injeção com recurso a simulações numéricas, geralmente baseadas no método dos elementos finitos (MEF).

Este trabalho, realizado no âmbito de um estágio curricular na empresa Prinemo, teve como principal objetivo analisar, utilizando o MEF, o processo de moldagem por injeção de peças em ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno), destinadas à indústria automóvel, de forma a compreender a origem dos defeitos de rebarba e de chupado exibidos pelas peças e propor soluções que permitissem evitar estes defeitos.

Numa primeira etapa, foi efetuada uma análise do processo de injeção atualmente utilizadas na produção das peças que permitiu verificar a necessidade de aplicação de uma força de fecho do molde muito elevada, que favorece a formação de rebarba. As simulações numéricas permitiram também verificar que se desenvolvia um gradiente de contração nas peças relativamente elevado que favorece a formação do defeito de chupado. Neste contexto, foram propostos 3 conjuntos diferentes de alteração ao molde e às condições de injeção. Os cálculos efetuados permitiram analisar as vantagens e desvantagens relativas de cada proposta, tendo-se verificado que uma delas conduzia a uma maior diminuição da força de fecho do molde e, consequentemente, a uma menor tendência para o desenvolvimento de rebarba nas peças. Esta solução também permitia reduzir a pressão de injeção e as diferenças de contração nas peças mais pequenas. No entanto, não conduzia a uma alteração significativa do gradiente de contração desenvolvido nas peças grandes e requeria a produção de um novo molde de injeção.

keywords

Finite element method, injection molding, thermoplastic polymers.

abstract

Injection is one of the most widely used polymer moulding techniques. However, due to the high costs of injection equipment, mold and auxiliary equipment, the economic viability of this processing step requires an optimization of the injection conditions using numerical simulations, usually based on the finite element method (MEF).

The main objective of this work, carried out within the scope of the curricular internship at Prinemo enterprise, was to analyse, using the MEF, the injection moulding process of ABS (acrylonitrile-butadiene-styrene) pieces for the automotive industry, in order to understand the origin of the flash and sink marks defects exhibited by the pieces and propose solutions to avoid these defects.

In a first step, an analysis of the injection process currently used in the production of the parts was carried out, which allowed to verify the need to apply a very high mold closing force, which favours the formation of flash defects. The numerical simulations also allowed to verify the development of a relatively high contraction gradient in the pieces which favours the formation of sink marks defects. In this context, 3 different sets of changes to the mold and to the injection conditions were proposed. The calculations carried out allowed to analyse the relative advantages and disadvantages of each proposal, one of which led to a larger reduction of the mold closing force and, consequently, to a lower tendency for the development of flash defects in the pieces. This solution also allowed to reduce the injection pressure and the differences of contraction in the smaller pieces. However, this proposal did not lead to a significant change in the contraction gradient developed in larger pieces and requires the production of a new injection mold.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	III
------------------------	-----

ÍNDICE DE TABELAS.....	VIII
------------------------	------

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MATERIAIS POLIMÉRICOS E SUA CLASSIFICAÇÃO.....	1
1.2	O PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO	3
1.2.1	Componentes do molde.....	4
1.2.1.1	Zona moldante.....	4
1.2.1.2	Sistema de alimentação.....	5
1.2.1.3	Sistema de ataque	7
1.2.1.4	Sistema de centragem e alinhamento	8
1.2.1.5	Sistema de escape de gases.....	8
1.2.1.6	Sistema de arrefecimento.....	9
1.2.1.7	Sistema de extração.....	10
1.3	O CICLO DE INJEÇÃO	10
1.3.1	Etapa de fecho do molde	11
1.3.2	Etapa de enchimento	11
1.3.3	Etapa de compactação	12
1.3.4	Etapa de plasticização e arrefecimento	12
1.3.5	Etapa de abertura do molde e extração.....	13
1.4	ASPETOS FENOMENOLÓGICO DO PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO.....	14
1.4.1	Escoamento do polímero na fase de enchimento da cavidade do molde	14
1.4.2	Efeito da pressão de injeção	17
1.4.3	Defeitos típicos de moldagem.....	20
1.4.3.1	Rebarba.....	20
1.4.3.2	Chupado.....	21
1.4.3.3	Linhas de soldadura e de união.	21
1.4.3.4	Marcas devido ao efeito jato	22
1.4.3.5	Hesitações.....	23

1.4.3.6	Prisões de ar	23
1.4.3.7	Empeno	24
1.4.4	A “janela” de moldação por injeção	24
1.5	O POLÍMERO ABS (ACRILONITRILO-BUTADIENO-ESTIRENO).	25
1.6	O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.	25
1.7	A EMPRESA PRINEMO.	27
2	REALIZAÇÃO EXPERIMENTAL.	29
2.1	MODELAÇÃO 3D DA CAVIDADE MOLDANTE E SUA DISCRETIZAÇÃO	31
2.2	MODELAÇÃO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO.	33
2.3	CARACTERÍSTICAS NO POLÍMERO INJETADO	34
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
3.1	ANÁLISE DO PROCESSO DE INJEÇÃO ATUAL	36
3.2	PROPOSTA DE ALTERAÇÃO 1	43
3.3	PROPOSTA DE ALTERAÇÃO 2	48
3.4	PROPOSTA DE ALTERAÇÃO 3	55
4	CONCLUSÕES	63
6	TRABALHOS FUTUROS	65
7	BIBLIOGRAFIA	66
8	ANEXOS	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Cadeias macromoleculares a) lineares, b) ramificadas e c) reticulada [1].-----	2
Figura 2 - Importância relativa dos diferentes métodos de moldação de termoplásticos [4]. -----	3
Figura 3 - Sistema típico de moldagem por injeção [4].-----	4
Figura 4 - Componentes básicos internos de um molde de duas placas [8]. -----	5
Figura 5 - Constituintes do sistema de alimentação [4].-----	6
Figura 6 - Sistema de canais quentes e válvulas [9]. -----	6
Figura 7 – Ataques do tipo a) lâmina, b) leque e c) Bayer [7,10].-----	7
Figura 8 - Esquema externo de um molde fechado [10]. -----	8
Figura 9 - Sistema de gases de escape de um molde de injeção [8].-----	9
Figura 10 - Duração típica de diversas etapas do ciclo do processo de moldagem por injeção [4]. -	9
Figura 11 – Efeito no tempo da etapa de arrefecimento e na distorção da forma das peças devido a arrefecimento proporcionado por dois sistemas de arrefecimento diferentes. a) arrefecimento uniforme e b) arrefecimento não uniforme [4].-----	10
Figura 12 - Etapas do ciclo de moldação por injeção [7].-----	11
Figura 13 - Ilustração da etapa de fecho do molde, durante o ciclo de moldagem por injeção [4].	11
Figura 14 - Ilustração da etapa de injeção, durante o ciclo de moldagem por injeção [4]. -----	12
Figura 15 - Ilustração da etapa de pressurização, durante o ciclo de moldagem por injeção [4].--	12
Figura 16 - Ilustração da etapa de compactação e arrefecimento, durante o ciclo de moldagem por injeção. [4]-----	13
Figura 17 – Alteração da posição do parafuso durante a injeção.-----	13
Figura 18 - Ilustração da etapa de plasticização e arrefecimento, durante o ciclo de moldagem por injeção. [4]-----	14
Figura 19 - Escoamento do fundido e da direção de fluxo de calor na cavidade do molde [4].----	14
Figura 20 – Gradiente de velocidades de escoamento gerado num fluido por ação de uma tensão de corte.-----	15

Figura 21 - a) Velocidade de escoamento e b) velocidade de deformação de corte no interior do molde [4].	16
Figura 22 - Orientação molecular ao longo do da secção da peça polimérica obtida por injeção [4].	17
Figura 23 - Efeito da velocidade de deformação de corte, temperatura e pressão na viscosidade de polímero [4].	18
Figura 24 - Variação da pressão durante o processo de enchimento da cavidade do molde [4].	18
Figura 25 - Defeito de rebarba (zonas identificadas com linhas vermelhas) [4].	20
Figura 26 - Defeito do chupado (zona identificadas com linha vermelha. a) Geometria pretendida e b) formação do chupado devido a retração não uniforme da peça [4].	21
Figura 27 - Ilustração da formação de a) duas linhas de fluxo, b) formação de linhas de soldadura e c) formação de linhas de união [4].	22
Figura 28 – a) Efeito de jato e b) enchimento ideal da cavidade com frente de fluxo contínua radial ou paralela [4].	22
Figura 29 – Efeito da a) alteração da posição e b) da geometria do ataque no efeito de jato [4].	23
Figura 30 – Hesitações resultantes da variação da espessura da peça.	23
Figura 31 – A “janela” de moldação por injeção [14].	24
Figura 32 – Contribuição de cada monómero para as propriedades do ABS [15].	25
Figura 33 - Representação esquemática do processo de discretização de um domínio em elementos finitos [17].	26
Figura 34 - Exemplos de formas geométricas possíveis para elementos finitos [17].	27
Figura 35 – Empresas do grupo PRIFER	28
Figura 36 – Peças estudadas neste trabalho. a) Faces frontais e b) faces contrárias. Nas imagens são também visíveis os gitos correspondentes aos canais frios que constituem o sistema de alimentação utilizado na produção das peças.	29
Figura 37 - Defeitos (identificados com as linhas vermelhas) de a) rebarba e b) chupado nas peças estudadas.	30
Figura 38 – Modelo 3D das peças estudadas.	31

Figura 39 - Placas constituintes do molde utilizado na produção por injeção das peças estudadas. As linhas vermelhas em b) definem a cavidade moldante das peças. -----	31
Figura 40 – Pormenores da face não visível (zona técnica) de uma peça grande.-----	32
Figura 41 – Cavidades moldantes e sistema de alimentação utilizados na produção das peças estudadas. Os canais a vermelho e a verde correspondem a, respetivamente, canais de alimentação quentes e frios. Na imagem também é apresentada o pormenor o ataque em lâmina de uma peça. -----	33
Figura 42 - Gráfico representativo da viscosidade com a velocidade de deformação de corte em várias temperaturas do ABS – Terluran HH-112, BASF [13]. -----	35
Figura 43 – Posição e velocidade de avanço do parafuso da máquina injetora durante a etapa de enchimento das cavidades do molde. -----	37
Figura 44 – a) Posição do parafuso da máquina injetora e b) pressão no bico de injeção durante a etapa de compactação.-----	38
Figura 45 -Evolução prevista pela simulação numérica para a posição da frente de fluxo do polímero durante a etapa de enchimento das cavidades moldantes das peças. -----	39
Figura 46 - Valores previstos pela simulação numérica para a pressão em diferentes pontos do interior das cavidades moldantes das peças no fim da etapa de enchimento.-----	40
Figura 47 - Evolução prevista pela simulação numérica da pressão no bico de injeção. -----	40
Figura 48 - Evolução prevista pela simulação numérica da pressão nas zonas dos ataques (cuja localização é identificada na figura) de cada peça. -----	41
Figura 49 - Evolução prevista pela simulação numérica da força de fecho do molde. -----	42
Figura 50 - Valores previstos pela simulação numérica para a contração volúmica média (ao longo da espessura) em diferentes pontos das peças.-----	42
Figura 51 - Sistema de ataque a) em lâmina, utilizado atualmente na produção das peças e b) em leque, considerado na proposta de alteração 1. -----	44
Figura 52 - Evolução prevista pela simulação numérica para a posição da frente de fluxo do polímero durante a etapa de enchimento das cavidades moldantes das peças, considerando a proposta de alteração 1. -----	45

Figura 53 - Valores previstos pela simulação numérica para a pressão em diferentes pontos do interior das cavidades moldantes das peças no fim da etapa de enchimento, considerando a proposta de alteração 1. -----	45
Figura 54 - Evolução prevista pela simulação numérica da pressão no bico de injeção, considerando a proposta de alteração 1. -----	46
Figura 55 - Evolução prevista pela simulação numérica da pressão nas zonas dos ataques (cuja localização é identificada na figura) de cada peça, considerando a proposta de alteração 1. -----	47
Figura 56 - Evolução prevista pela simulação numérica da força de fecho do molde, considerando a proposta de alteração 1. -----	47
Figura 57 - Valores previstos pela simulação numérica para a contração volúmica média (ao longo da espessura) em diferentes pontos das peças, considerando a proposta de alteração 1. ---	48
Figura 58 - Sistema de alimentação alternativo proposto. Os canais quentes e frios são representados a vermelho e verde, respetivamente. Na figura também é apresentado uma ampliação da zona do ataque adicionais do tipo Bayer.-----	49
Figura 59 - Valores previstos pela simulação numérica para a pressão em diferentes pontos do interior das cavidades moldantes das peças no fim da etapa de enchimento, considerando a proposta de alteração 2. -----	51
Figura 60 - Evolução prevista pela simulação numérica para a posição da frente de fluxo do polímero durante a etapa de enchimento das cavidades moldantes das peças, considerando a proposta de alteração 2. -----	51
Figura 61 - Evolução prevista pela simulação numérica da pressão no bico de injeção, considerando a proposta de alteração 2. -----	52
Figura 62 - Evolução prevista pela simulação numérica da pressão nas zonas dos ataques (cuja localização é identificada na figura) de cada peça, considerando a proposta de alteração 2. -----	53
Figura 63 - Evolução prevista pela simulação numérica da força de fecho do molde, considerando a proposta de alteração 2. -----	53
Figura 64 – Velocidade de deformação de corte na zona dos ataques tipo Bayer prevista pela simulação numérica para a proposta 2. -----	54
Figura 65 - Valores previstos pela simulação numérica para a contração volúmica média (ao longo da espessura) em diferentes pontos das peças, considerando a proposta de alteração 2. ---	54

Figura 66 – Alteração do posicionamento das cavidades moldantes das peças pequenas e novo sistema de alimentação. -----	55
Figura 67 - Configuração proposta das cavidades moldantes das peças e sistema de alimentação. Os canais quentes e frios são representados a vermelho e verde, respetivamente. -----	56
Figura 68 - Evolução prevista pela simulação numérica para a posição da frente de fluxo do polímero durante a etapa de enchimento das cavidades moldantes das peças, considerando a proposta de alteração 3. -----	58
Figura 69 - Valores previstos pela simulação numérica para a pressão em diferentes pontos do interior das cavidades moldantes das peças no fim da etapa de enchimento, considerando a proposta de alteração 3. -----	59
Figura 70 - Evolução prevista pela simulação numérica da pressão no bico de injeção, considerando a proposta de alteração 3. -----	59
Figura 71 - Evolução prevista pela simulação numérica da pressão nas zonas dos ataques (cuja localização é identificada na figura) de cada peça, considerando a proposta de alteração 2. -----	60
Figura 72 - Evolução prevista pela simulação numérica da força de fecho do molde, considerando a proposta de alteração 3. -----	60
Figura 73 - Velocidade de deformação de corte na zona dos ataques tipo Bayer prevista pela simulação numérica para a proposta 3. -----	61
Figura 74 - Valores previstos pela simulação numérica de contração volúmica média (ao longo da espessura) em diferentes pontos das peças, considerando a proposta de alteração 3. -----	61

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 –Alguns fatores que influenciam a pressão de injeção [4].-----	19
Tabela 2 – Características do sistema de alimentação do molde utilizado na produção das peças estudadas. -----	34
Tabela 3 - Características principais do polímero ABS, referência Terluran HH-112 [20]. -----	34
Tabela 4 – Condições recomendadas para a moldagem por injeção do ABS Terluran HH-112 [13,20]. -----	35
Tabela 5 - Parâmetros do processo de moldagem por injeção utilizados na produção das peças estudadas. -----	36
Tabela 6 - Parâmetros iniciais utilizados na simulação do processo atual de injeção das peças. ---	38
Tabela 7 – Duração prevista pela simulação numérica para a etapa de enchimento de cada peça. -----	39
Tabela 8 - Características do sistema de alimentação considerado na proposta de alteração 1.---	43
Tabela 9 – Duração prevista pela simulação numérica para a etapa de enchimento de cada peça, considerando a proposta de alteração 1. -----	44
Tabela 10 - Características do sistema de alimentação considerado na proposta de alteração 2. -	49
Tabela 11 - Duração prevista pela simulação numérica para a etapa de enchimento de cada peça, considerando a proposta de alteração 2. -----	50
Tabela 12 - Características do sistema de alimentação, considerado na proposta de alteração 3. C1, C2, C3 e C4 representam os canais quentes identificados na Figura 67. -----	57
Tabela 13 – Duração prevista pela simulação numérica para a etapa de enchimento de cada peça, considerando a proposta de alteração 3. -----	57
Tabela 14 - Resumo dos resultados principais obtidos no estudo. -----	64

1 INTRODUÇÃO

1.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS E SUA CLASSIFICAÇÃO

Os polímeros são constituídos por cadeias macromoleculares formadas por átomos unidos por ligações covalentes. Estas cadeias são geralmente muito longas e podem também conter átomos ou grupos de átomos ligados lateralmente à cadeia macromolecular principal. Estas cadeias resultam da repetição de unidades menores, denominados meros. Se as cadeias forem constituídas por apenas um tipo de mero, o polímero diz-se homopolímero. Se as cadeias forem compostas por dois ou mais meros diferentes, o polímero é denominado copolímero [1].

Ao processo de formação das cadeias poliméricas por agrupamento de unidades menores, dá-se o nome de polimerização [2]. Este processo envolve geralmente reações de adição ou de condensação (também chamadas reações em cadeia ou em etapas, respetivamente). Dependendo das condições de polimerização, as cadeias macromoleculares obtidas podem ter distribuição de tamanhos e massas moleculares médias diferentes, que afetam as propriedades físicas do polímero [1].

Outra característica que condiciona as propriedades dos polímeros é a geometria das cadeias macromoleculares. Estas podem ser lineares, ramificadas ou reticuladas (Figura 1). Nos dois primeiros casos, as forças entre as cadeias macromoleculares são secundárias e, consequentemente, fracas. No caso das cadeias ramificadas, que se caracterizam por apresentarem ramificações laterais, o grau de ramificação condiciona o empacotamento das cadeias poliméricas e a densidade do polímero. As cadeias reticuladas são formadas por cadeias poliméricas que estão ligadas entre si por forças elevadas, através de ligações do tipo covalente [1].

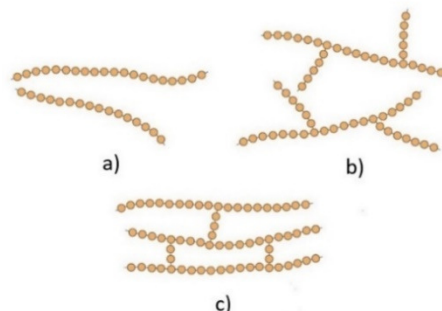


Figura 1 - Cadeias macromoleculares a) lineares, b) ramificadas e c) reticulada [1].

Os polímeros podem ser classificados tendo em conta diferentes aspetos como, por exemplo, a sua aplicação, as suas propriedades, a origem natural ou sintética, a estrutura do mero, se apresentam ou não meros diferentes, a geometria da cadeia macromolecular, o grau de cristalização, etc. [3]. Uma das classificações mais comuns é baseada nas propriedades dos polímeros. Neste caso, os materiais poliméricos são geralmente classificados em elastómeros (ou borrachas), termorrígidos e termoplásticos [3]. Os elastómeros caracterizam-se por apresentarem grandes deformações elásticas quando submetidos a uma força. Esta característica é uma consequência de um reduzido grau de reticulação, que permite o deslizamento relativo e a recuperação das posições originais das cadeias macromoleculares quando o elastómero é, respetivamente, submetido a uma força e quando esta é removida. Os polímeros termorrígidos (também denominados por termoendurecíveis ou termofixos) apresentam uma estrutura macromolecular bastante reticulada que dificulta a alteração das posições relativas das cadeias moleculares, degradando-se antes de atingir a temperatura de fusão, pelo que não podem ser refundidos e reprocessados [3]. Pelo contrário, os polímeros termoplásticos podem ser repetidamente fundidos e solidificados, através de aquecimento e arrefecimento, sem alteração significativa das suas propriedades. Estes materiais são constituídos por cadeias macromoleculares lineares ou ramificadas. A reduzida força intermolecular neste tipo de polímeros permitem que, por ação combinada de energia térmica e de uma força aplicada, a posição relativa das macromoléculas constituintes seja alterada e, conseqüentemente, seja possível alterar a forma do polímero por um processo de enformação a quente. Durante o arrefecimento, a mobilidade das macromoléculas volta a diminuir e o material solidifica, mantendo a forma adquirida anteriormente [3].

1.2 O PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO

Uma das etapas mais importantes do processamento de polímeros é a moldagem. No caso dos polímeros termoplásticos, a moldagem pode envolver a extrusão, moldagem por sopro, termoformação, injeção, etc. (Figura 2). Nestes processos, o polímero é aquecido até atingir uma viscosidade suficientemente reduzida que possibilite a sua moldagem (geralmente usando moldes ou fieiras) e, de seguida, arrefecido até adquirir a consistência suficiente [3].

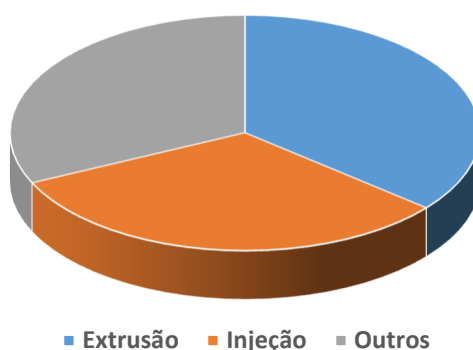


Figura 2 - Importância relativa dos diferentes métodos de moldação de termoplásticos [4].

A seleção do processo de moldagem efetivamente usado, depende da forma da peça, características do polímero, dimensões e precisão dimensional pretendidas, número de peças a produzir, custo de produção, etc. No caso de peças com forma complexa e elevada precisão dimensional, uma das técnicas de moldagem mais utilizadas é a injeção [5]. Neste processo, o material termoplástico (geralmente na forma de granulado) é aquecido até fundir e forçado a preencher sob pressão a cavidade de um molde com a forma pretendida. Após solidificação por arrefecimento no interior do molde, a peça é extraída e iniciado novo ciclo de injeção [6].

Os equipamentos de moldagem por injeção são constituídos por mecanismos de abertura e fecho do molde e por de um cilindro aquecido, no interior no qual existe um parafuso que empurra o polímero na direção do canal de alimentação principal do molde (Figura 3). A rotação do parafuso promove, por ação da compressão, atrito e contato com as paredes quentes do cilindro, o aquecimento do polímero e garante a homogeneização da sua composição e temperatura [4].

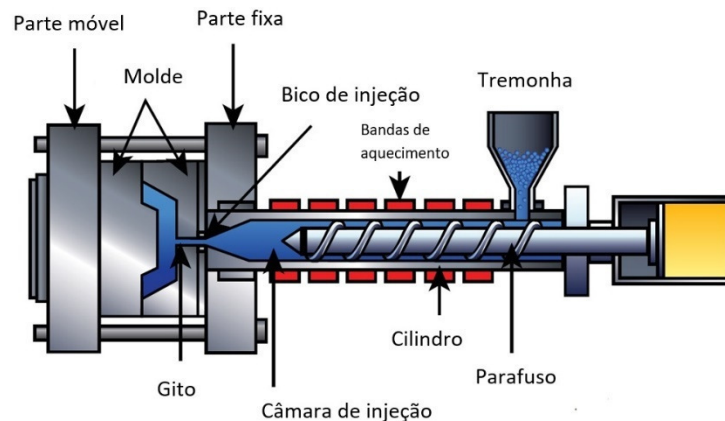


Figura 3 - Sistema típico de moldagem por injeção [4].

1.2.1 COMPONENTES DO MOLDE

Para além da máquina de injeção, o processo implica a existência de um molde constituído por, pelo menos, duas partes contendo a cavidade com a forma da peça a produzir. Estes moldes são geralmente em aço e são constituídos pelos seguintes elementos: zona moldante, sistema de alimentação, sistema de ataque, sistema de centragem e alinhamento, sistema de escape de gases e sistema de arrefecimento [7].

1.2.1.1 ZONA MOLDANTE

A zona moldante (ou cavidade) possui uma grande importância, visto que determina a forma da peça final. A estrutura típica de um molde de duas placas, que é o tipo do molde mais simples, é constituída por uma metade fixa ligada ao sistema de injeção e uma parte móvel que permite a abertura e extração da peça. Ambas as placas são geralmente em aço com elevada resistência ao desgaste, à corrosão e ao choque térmico. Na Figura 4 é apresentado um esquema de um molde fechado de duas placas (A e B) e a respetiva zona moldante [8].

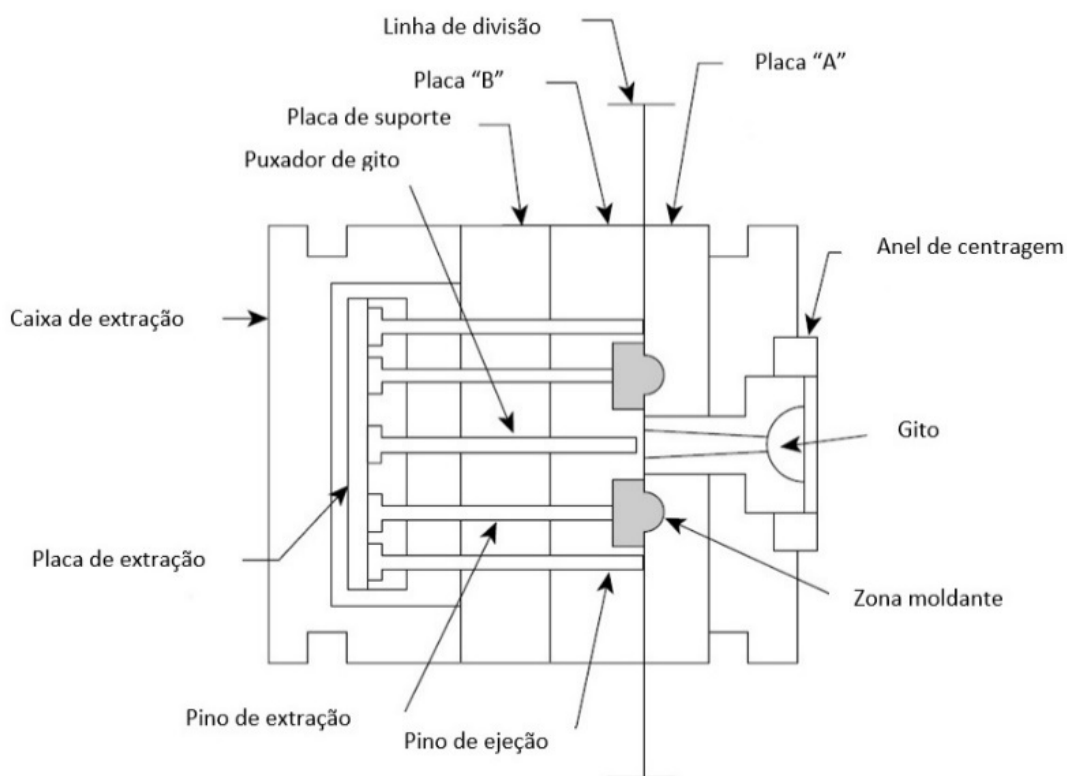


Figura 4 - Componentes básicos internos de um molde de duas placas [8].

1.2.1.2 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO

O sistema de alimentação (ou sistema de gitagem), é constituído por um conjunto de canais que permite o transporte do material para o interior da zona moldante. O fundido entra no molde pelo gito, que é um canal geralmente tronco-cónico divergente (Figura 5), que se pode ligar diretamente com a zona moldante ou ramificar-se num sistema de canais que permitem a alimentação em diferentes locais da zona moldante e/ou a produção de varias peças em simultâneo. Por vezes, o sistema de moldagem inclui um poço-frio que retêm o material mais frio da injeção anterior, evitando que este entre na cavidade ou obstrua as restantes zonas de alimentação [7].

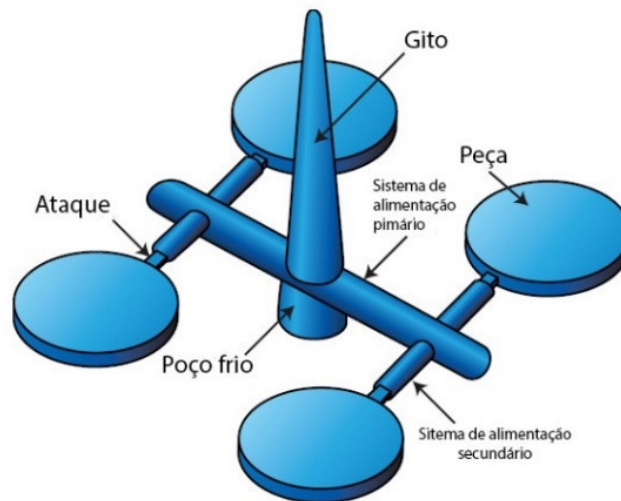


Figura 5 - Constituintes do sistema de alimentação [4].

As partes do molde que definem o sistema de alimentação podem ser arrefecidas conjuntamente com a peça ou mantidas quentes. No sistema com canais frios, o sistema de alimentação é formado e extraído em simultâneo com a peça, da qual é posteriormente separado e reutilizado em novos ciclos de injeção. No sistema com canais quentes (Figura 6), o material é mantido fundido no interior dos canais após a extração da peça e injetado durante o ciclo de injeção seguinte [7]. Neste último caso, existe um sistema de válvulas cujo obturador pode ser acionado para a abertura ou fecho, deixando ou não passar o polímero fundido. As válvulas podem estar posicionadas diretamente em contato com a zona moldante ou numa posição mais afastada ligada à zona moldante por canais frios [7,9].

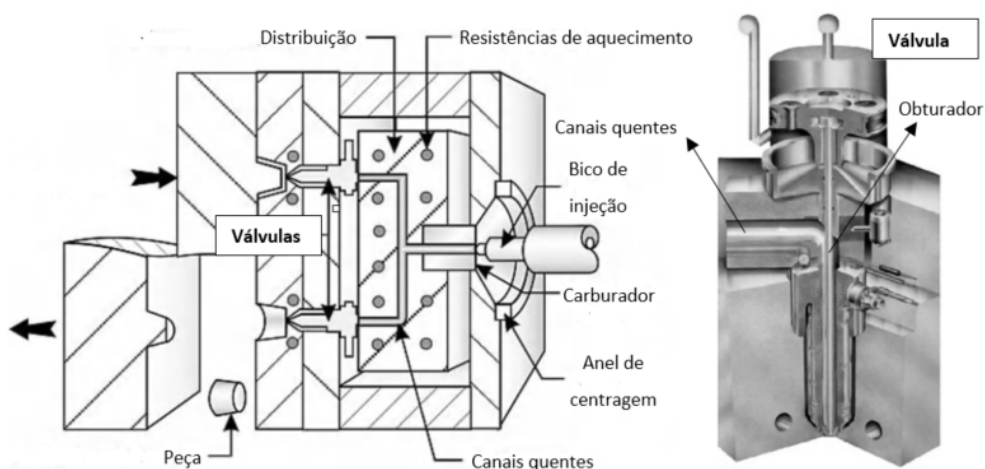


Figura 6 - Sistema de canais quentes e válvulas [9].

1.2.1.3 SISTEMA DE ATAQUE

O ataque é uma constrição entre o sistema de alimentação e a cavidade do molde (Figura 5). Tem como finalidade promover um aumento da temperatura do fundido através da aplicação de uma elevada velocidade de deformação de corte e, simultaneamente, dificultar o refluxo do material da zona moldante durante o recuo do parafuso para iniciar o novo ciclo de injeção. Adicionalmente, o ataque facilita o controlo do enchimento de cavidades (principalmente em moldes de várias cavidades ou com cavidades com mais do que um ataque) e facilita a separação do sistema de alimentação e a peça solidificada (no caso de moldes com canais frios). Entre os vários tipos de ataques (Figura 7) inclui-se o ataque com gito direto, ataque lateral ou á junta, ataque em lâmina, em leque, tipo Bayer, em anel, estrela, bico de alfinete, etc. [7].

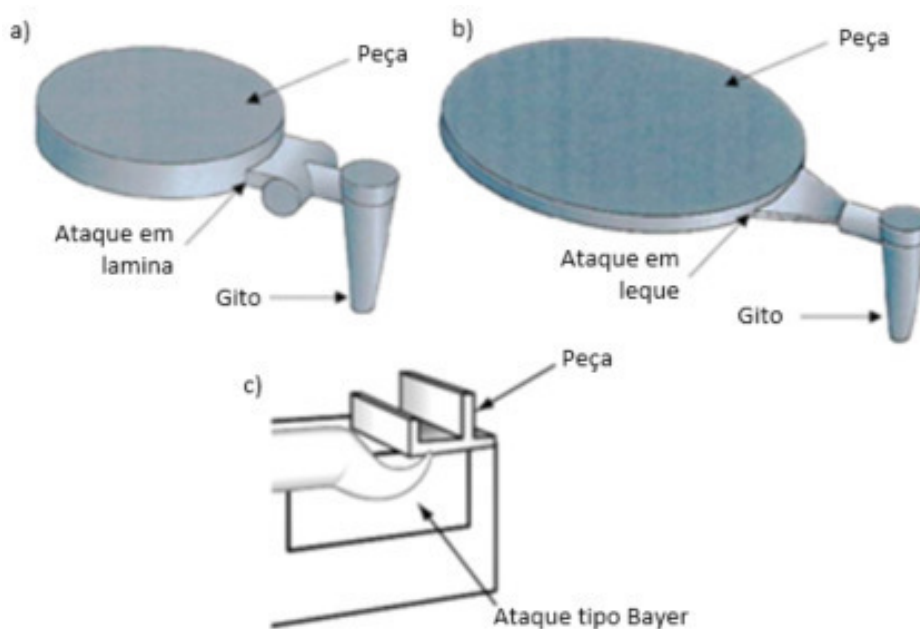


Figura 7 – Ataques do tipo a) lâmina, b) leque e c) Bayer [7,10].

A seleção do tipo de ataque depende do material a injetar, forma e dimensões da peça a produzir, características pretendidas de escoamento e de enchimento da zona moldante, etc. O posicionamento e o número de ataques utilizados devem evitar defeitos de enchimento da cavidade, como por exemplo, resultantes do efeito de jato ou produzidos durante separação do sistema de alimentação e a peça [7,10].

1.2.1.4 SISTEMA DE CENTRAGEM E ALINHAMENTO

O sistema de centragem e alinhamento permite a montagem do molde na injetora e o ajuste das partes do molde, assegurando o seu correto posicionamento relativo e o fecho completo (Figura 8).

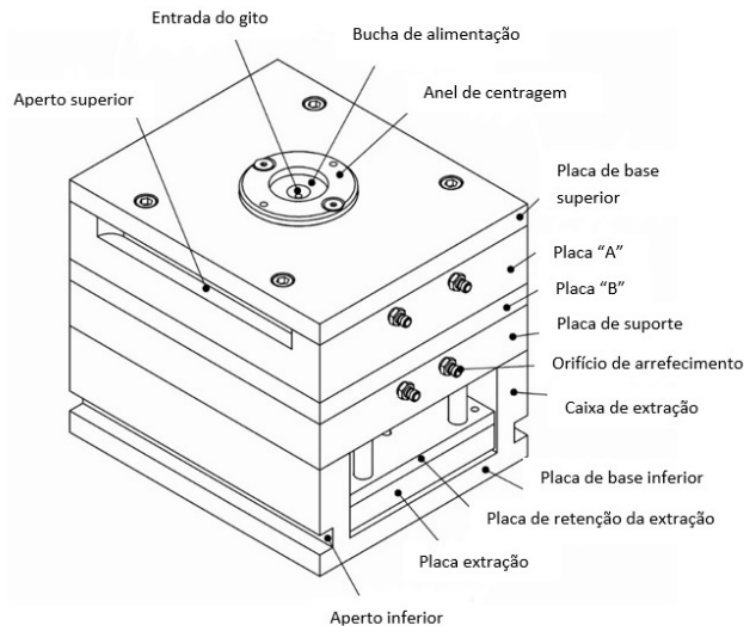


Figura 8 - Esquema externo de um molde fechado [10].

1.2.1.5 SISTEMA DE ESCAPE DE GASES

O sistema de escape de gases (Figura 9) permite que o ar existente no interior da cavidade do molde possa sair durante o enchimento com o polímero. A extração de gases deve ser efetuada na direção do fluxo do material, permitindo uma eficiente saída de ar ou de eventuais elementos voláteis libertados pelo fundido. A incorreta localização ou dimensionamento deste sistema poderá provocar um deficiente preenchimento da cavidade e contração irregular da peça injetada. Estes problemas tornam-se mais acentuados em peças de paredes finas moldadas com velocidades de injeção elevadas [7,8]. Adicionalmente, a secção de cada canal deste sistema deverá ser dimensionada de forma a permitir a saída dos gases sem, no entanto, possibilitar o fluxo do polímero fundido para o seu interior ou a formação de rebarbas nas peças [8].

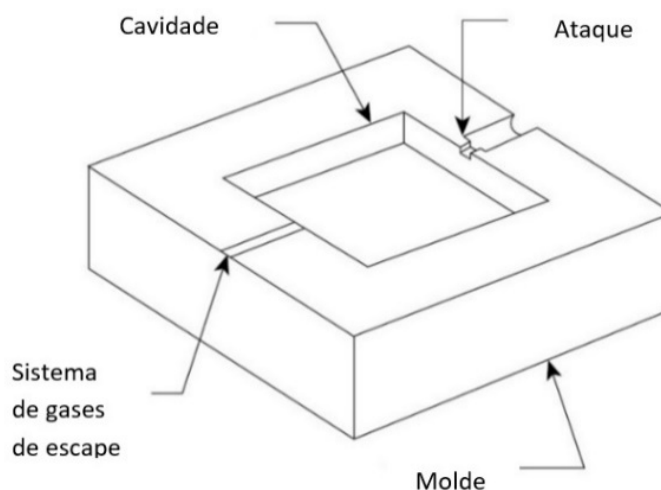


Figura 9 - Sistema de gases de escape de um molde de injeção [8].

1.2.1.6 SISTEMA DE ARREFECIMENTO

O sistema de arrefecimento é constituído por um conjunto de canais onde circula um fluido refrigerante (geralmente água) que permite um arrefecimento mais rápido do fundido e, consequentemente, uma solidificação mais rápida da peça. A otimização do sistema de arrefecimento em função da geometria da cavidade do molde é muito importante, dado que a etapa de arrefecimento pode representar mais de dois terços do tempo total do ciclo de produção (Figura 10) [4,7].



Figura 10 - Duração típica de diversas etapas do ciclo do processo de moldagem por injeção [4].

A título de exemplo, são apresentados na figura seguinte os efeitos típicos no tempo da etapa de arrefecimento e na distorção da forma das peças devido a arrefecimento não uniforme proporcionado por dois sistemas de arrefecimento diferentes [4].

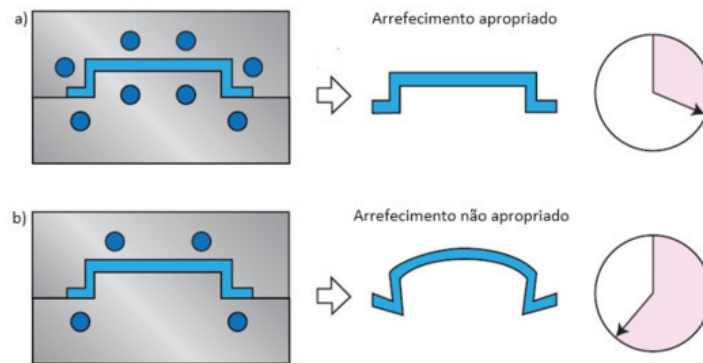


Figura 11 – Efeito no tempo da etapa de arrefecimento e na distorção da forma das peças devido a arrefecimento proporcionado por dois sistemas de arrefecimento diferentes. a) arrefecimento uniforme e b) arrefecimento não uniforme [4].

1.2.1.7 SISTEMA DE EXTRAÇÃO

O sistema de extração (Figura 4) é o conjunto de componentes mecânicos que promove a extração da peça após arrefecimento do interior da cavidade do molde. O correto funcionamento deste sistema deverá garantir a não distorção da peça durante esta etapa final do processo de injeção [7].

1.3 O CICLO DE INJEÇÃO

Cada ciclo de moldagem por injeção é constituído por diversas etapas sequenciais, nomeadamente a etapa de fecho do molde, de enchimento, de compactação, de plasticização, de arrefecimento, de abertura do molde, de extração da peça e de pausa antes de se iniciar o novo ciclo de injeção (Figura 12).

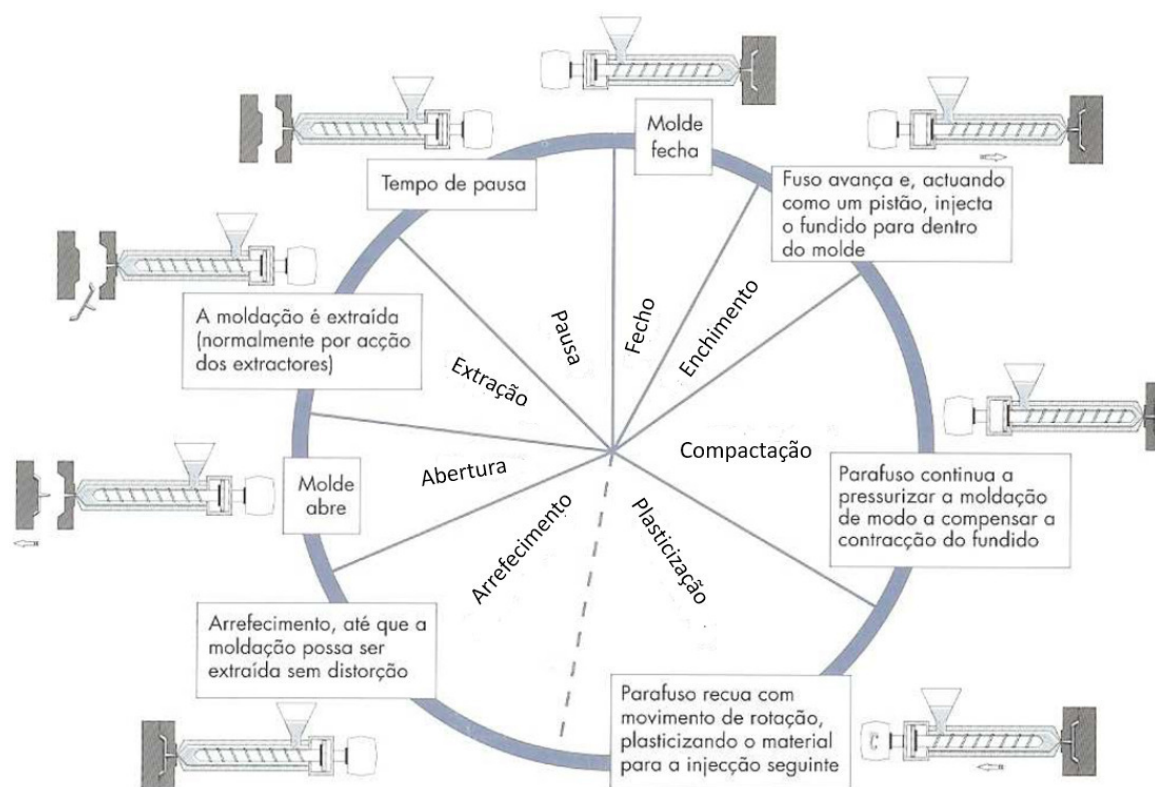


Figura 12 - Etapas do ciclo de moldação por injeção [7].

1.3.1 ETAPA DE FECHO DO MOLDE

Inicialmente o molde é fechado, definindo uma cavidade interna com a forma pretendida para onde o polímero será injetado através dos sistemas de canais alimentação [7].

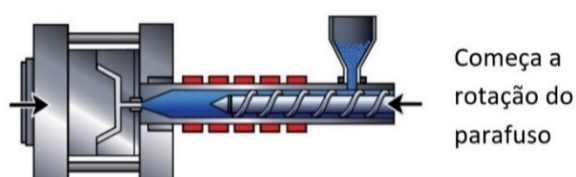


Figura 13 - Ilustração da etapa de fecho do molde, durante o ciclo de moldagem por injeção [4].

1.3.2 ETAPA DE ENCHIMENTO

Nesta etapa inicia-se o enchimento do molde com o avanço sem rotação do parafuso (por ação de um êmbolo) que injeta o polímero amolecido para o interior da cavidade do molde. Durante este processo o ar é expelido através do sistema de escape de gases [7].

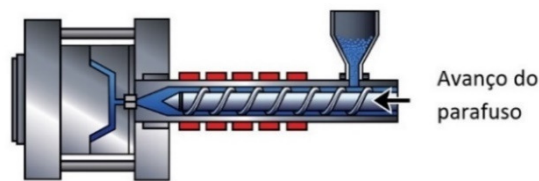


Figura 14 - Ilustração da etapa de injeção, durante o ciclo de moldagem por injeção [4].

1.3.3 ETAPA DE COMPACTAÇÃO

Esta etapa (também conhecida como etapa de pressurização) só se inicia quando o interior da cavidade do molde está quase ou totalmente preenchido com o polímero e caracteriza-se por um aumento da pressão, de forma a compensar a contração da peça durante a solidificação [7]. A transição da etapa de enchimento para a de compactação designa-se por ponto de comutação.

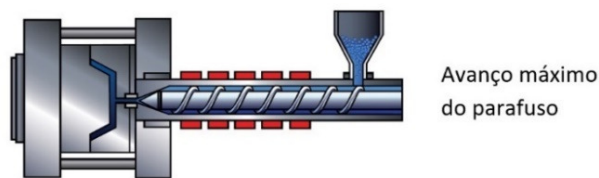


Figura 15 - Ilustração da etapa de pressurização, durante o ciclo de moldagem por injeção [4].

1.3.4 ETAPA DE PLASTICIZAÇÃO E ARREFECIMENTO

Esta etapa tem início quando o polímero nos canais de alimentação encontra-se solidificado, impedindo a introdução de mais material no molde ou o seu escoamento do sentido inverso. Isto permite ao parafuso recuar e rodar, plasticizando o material para o ciclo de injeção seguinte. Esta ação do parafuso é importante, porque permite homogeneizar a composição e temperatura do material. Com efeito, a ausência desta etapa poderia conduzir a fortes gradientes de temperatura ao longo da secção da câmara de injeção devido à reduzida condutividade térmica do polímero, provocando a sua degradação por sobreaquecimento nas zonas em contato com as paredes aquecidas da câmara de injeção [7].

Durante esta etapa, o material do interior do molde continua a arrefecer (geralmente, este processo é acelerado por ação do sistema de arrefecimento) até atingir uma consistência suficiente que permita a desmoldagem sem distorção da peça [7].



Figura 16 - Ilustração da etapa de compactação e arrefecimento, durante o ciclo de moldagem por injeção. [4]

A posição do parafuso da máquina de injeção nesta etapa (Figura 17) é determinada pelo volume de material utilizado para encher a zona moldante (dosagem) e por um volume adicional de material não injetado (almofada) [7].

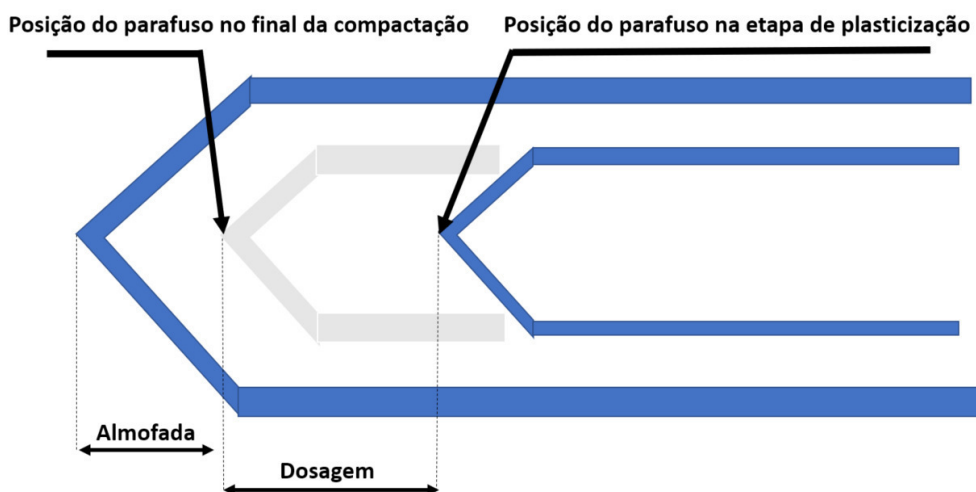


Figura 17 – Alteração da posição do parafuso durante a injeção.

1.3.5 ETAPA DE ABERTURA DO MOLDE E EXTRAÇÃO

A abertura do molde e a ação do sistema de extração permitem a remoção da peça e, no caso de sistema de canais frios, do sistema de alimentação do interior do molde, para que se inicie um novo ciclo de injeção [7].

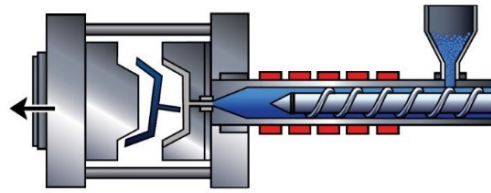


Figura 18 - Ilustração da etapa de plasticização e arrefecimento, durante o ciclo de moldagem por injeção. [4]

1.4 ASPETOS FENOMENOLÓGICO DO PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO

1.4.1 ESCOAMENTO DO POLÍMERO NA FASE DE ENCHIMENTO DA CAVIDADE DO MOLDE

Na fase de enchimento do molde, o contacto do polímero fundido com as paredes frias do molde promove o seu rápido arrefecimento e solidificação, enquanto que o centro permanece líquido e flui continuamente (Figura 19). Este escoamento gera calor por fricção e traduz-se num fornecimento contínuo de material quente, cujo calor é perdido por transferência térmica através da camada solidificada na superfície do molde [4,7].

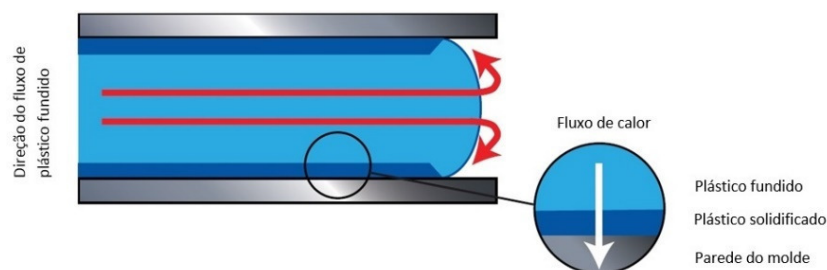


Figura 19 - Escoamento do fundido e da direção de fluxo de calor na cavidade do molde [4].

Inicialmente a espessura da camada solidificada é reduzida e a transferência de calor é relativamente eficiente. No entanto, com o aumento da espessura da camada solidificada, a velocidade de transferência do calor diminui até ser atingido o equilíbrio entre o calor perdido por condução e o aumento de calor associado ao fornecimento de material quente no centro da cavidade juntamente com calor gerado por fricção [4].

Uma consequência direta do gradiente de temperatura gerado durante o escoamento do polímero fundido no interior da cavidade do molde é a formação de um gradiente de viscosidade que acentua o gradiente da velocidade de escoamento gerado ao longo da seção da cavidade.

A viscosidade, que traduz a resistência do material ao escoamento, é um parâmetro que condiciona fortemente o preenchimento das cavidades do molde, a formação de defeitos nas peças injetadas e as condições de injeção (tempo de injeção, pressão, etc.). Este parâmetro é dado pela razão entre a tensão de corte aplicada (τ) e o gradiente de velocidade de escoamento (ou velocidade de deformação de corte – D) gerado no fluido [11]:

$$\eta = \frac{\tau}{D} \quad (1)$$

Por sua vez, τ e D são dados por:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2)$$

$$D = \frac{dv}{dy} \quad (3)$$

em que F é a força tangencial exercida do fluido, A é a área em que a força é exercida, v e y são, respectivamente, a velocidade de escoamento e a distância até à camada de fluido em que é aplicada a força F (Figura 20):

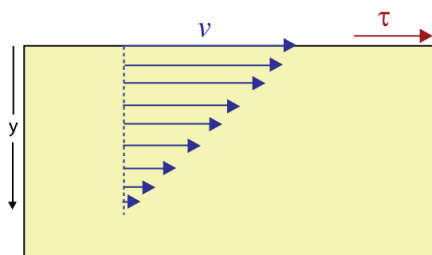


Figura 20 – Gradiente de velocidades de escoamento gerado num fluido por ação de uma tensão de corte.

Dependendo da evolução viscosidade com a velocidade de deformação de corte, o fluido pode ser classificado como newtoniano ou não newtoniano. No primeiro caso, a viscosidade é independente da velocidade de deformação de corte. No segundo caso, a viscosidade aumenta

(fluido dilatante) ou diminui (fluido pseudoplástico) com o aumento da velocidade de deformação de corte.

Devido à sua estrutura constituída por cadeias macromoleculares longas, os termoplásticos fundidos apresentam viscosidades relativamente elevadas. No entanto, este valor diminui quando a temperatura e/ou a velocidade de corte do fundido aumentam. Isto significa que o gradiente de temperatura resultante da transferência de calor do fluido para as paredes frias do molde dá origem a um gradiente de viscosidade que se traduz numa variação da velocidade de escoamento ao longo da seção transversal das cavidades do molde (Figura 21). A velocidade de deformação de corte resultante é máxima próximo da camada solidificada em contacto com as paredes do molde e é responsável por um alinhamento das cadeias macromoleculares do polímero na direção do fluxo [5].

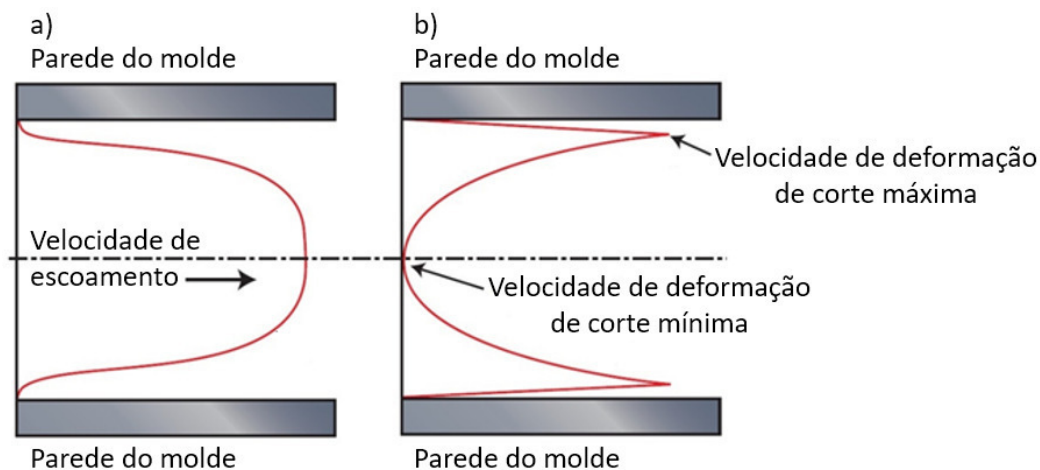


Figura 21 - a) Velocidade de escoamento e b) velocidade de deformação de corte no interior do molde [4].

Devido ao arrefecimento mais rápido junto às paredes do molde, este alinhamento tende a ser mais preservado na superfície externa das peças injetadas (Figura 22). Este material orientado tem uma maior tendência a retrair durante o arrefecimento, o que se traduz no desenvolvimento de tensões de tração na superfície e de compressão no interior da peça. Estas tensões residuais estão frequentemente na origem de empenos das peças moldadas por injeção [11].



Figura 22 - Orientação molecular ao longo do da secção da peça polimérica obtida por injeção [4].

1.4.2 EFEITO DA PRESSÃO DE INJEÇÃO

Um dos parâmetros que mais afeta o processo de injeção e as características das peças obtidas é a pressão de injeção. Com efeito, o aumento da pressão origina numa diminuição da mobilidade das cadeias macromoleculares do polímero e, conseqüentemente, numa maior viscosidade durante o processo de enchimento da cavidade do molde (Figura 23). Adicionalmente, a estrutura macromolecular confere aos polímeros uma elevada compressibilidade. Isto significa que o volume de material que preenche a cavidade do molde depende da pressão a que está sujeito que, por sua vez, varia ao longo do processo de injeção e ao longo da peça (Figura 24) [4].

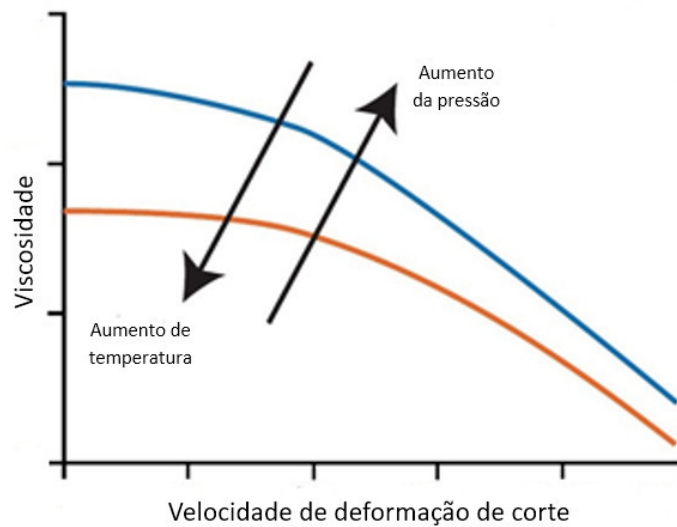


Figura 23 - Efeito da velocidade de deformação de corte, temperatura e pressão na viscosidade de polímero [4].

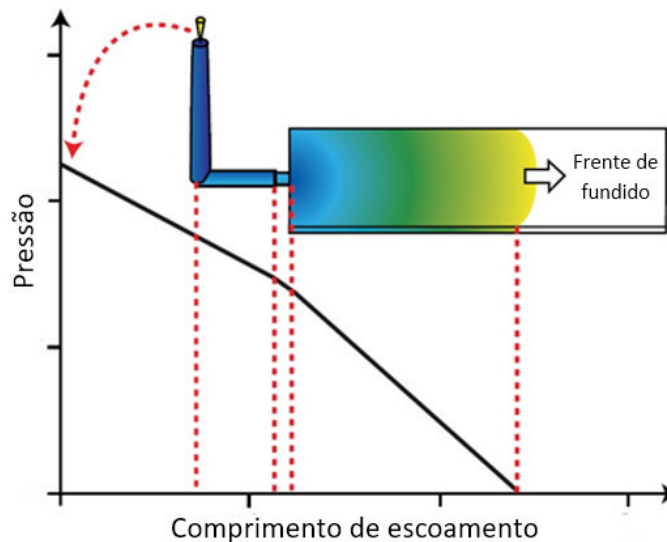
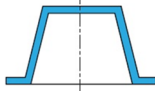
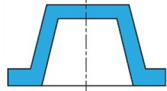
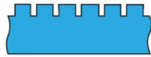

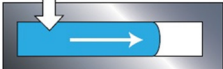

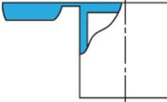
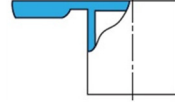


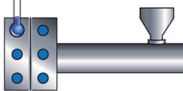
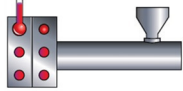



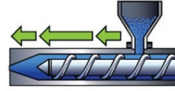




Figura 24 - Variação da pressão durante o processo de enchimento da cavidade do molde [4].

O valor de pressão e a sua variação com o tempo de injeção e local da cavidade moldante depende de vários fatores tais como a geometria da peça e do sistema de alimentação, o polímero utilizado, gradiente de temperaturas, pressão de injeção à entrada do molde, etc. Por sua vez, a pressão de injeção à entrada do molde é determinada por um conjunto bastante grande de fatores, alguns dos quais são apresentados na tabela seguinte [4].

Tabela 1 –Alguns fatores que influenciam a pressão de injeção [4].

Fatores	Variáveis	Mais pressão necessária	Menos pressão necessária
Geometria da peça	Espessura da peça	Peça fina 	Peça espessa 
	Superfície da peça	Mais temperatura de arrefecimento e superfícies bem definidas 	Menor temperatura de arrefecimento para superfícies lisas 
	Comprimento do fluxo	Comprimento de fluxo longo 	Comprimento de fluxo curto 
Geometria do sistema de alimentação	Dimensão do ataque	Ataque restritivo 	Ataque com maior seção 
	Canais do sistema de alimento	Diâmetro dos canais demasiados grandes ou pequenos 	Diametro do canal otimizado 
Condições de processamento	Temperatura do molde molde	Baixa temperatura de arrefecimento 	Alta temperatura de arrefecimento 
	Temperatura do fundido na injeção	Baixa temperatura do fundido 	Alta temperatura do fundido 
	Velocidade do parafuso	Velocidade imprópria do parafuso 	Velocidade otimizada do parafuso 
Seleção de material	Índice de fluidez	Pouca fluidez 	Elevada fluidez 

1.4.3 DEFEITOS TÍPICOS DE MOLDAGEM

Embora o processo de injeção permita a enformação com elevada produtividade de peças com geometria complexa, a qualidade do produto obtido depende fortemente da otimização das condições de injeção (temperatura, pressão, velocidade de injeção, etc.) e de concepção do molde (sistema alimentação, arrefecimento, extração, etc.). Entre os defeitos típicos que afetam a qualidade das peças injetadas encontram-se a rebarba, chupados, linhas de soldadura e de união, marcas resultantes do efeito de jato e hesitações, prisões de ar e empenos.

1.4.3.1 REBARBA

Este defeito (Figura 25) surge na forma de um excesso de material localizado geralmente nas linhas de junta da zona moldante das diferentes partes do molde, nas saídas de gases ou na zona dos extratores. Este defeito pode também resultar do deficiente alinhamento dos componentes e força de fecho do molde insuficiente para evitar a penetração do material fundido na zona de junta. Neste último caso, a eliminação do defeito poderá ser conseguida através do aumento da viscosidade (por exemplo, através da diminuição da temperatura) do fundido, redução da pressão máxima de injeção no interior da cavidade ou aumento da força de fecho do molde. Esta última solução poderá, no entanto, conduzir a um desgaste prematuro do molde e/ou deformação da cavidade moldante que poderá agravar o defeito de rebarba e alterar a geometria da peça injetada [9].

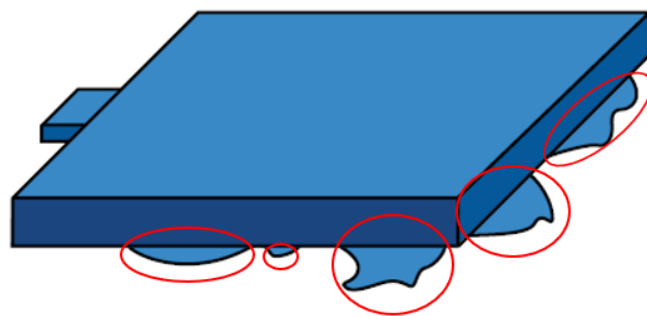


Figura 25 - Defeito de rebarba (zonas identificadas com linhas vermelhas) [4].

1.4.3.2 CHUPADO

O chupado é uma depressão nas superfícies das peças (Figura 26) resultantes de uma contração muito heterogênea do polímero durante o arrefecimento. Este tipo de defeito ocorre em zonas em que a contração da peça durante o arrefecimento é fortemente heterogênea devido a gradientes de compactação do polímero resultantes, por exemplo, de um elevado comprimento de fluxo e/ou da geometria da cavidade moldante [4].

Este defeito é favorecido pela utilização de temperaturas do fundido elevadas (maior retração no arrefecimento) e pelo aumento da pressão de compactação (que tende a acentuar estes gradientes de compactação do polímero) [4,12].

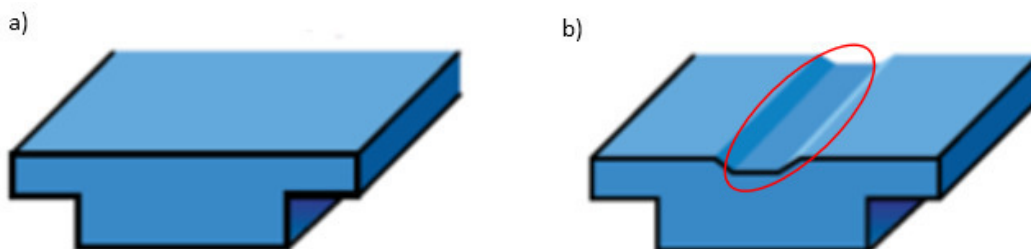


Figura 26 - Defeito do chupado (zona identificadas com linha vermelha. a) Geometria pretendida e b) formação do chupado devido a retração não uniforme da peça [4].

1.4.3.3 LINHAS DE SOLDADURA E DE UNIÃO.

As linhas de soldadura são marcas nas superfícies das peças resultantes da interseção de frentes de fluxo distintas (Figura 27). Estas linhas de soldadura constituem zonas de maior fragilidade e reduzem a qualidade estética da peça. [4, 13]. A eliminação destes defeitos é, muitas vezes, impossível devido ao formato da peça, mas podem ser reposicionados em zonas menos visíveis e com menos exigências em termos de resistência mecânica.

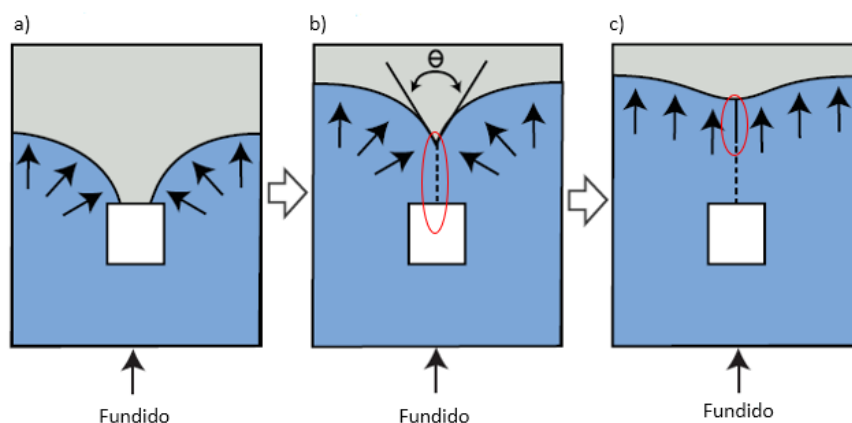


Figura 27 - Ilustração da formação de a) duas linhas de fluxo, b) formação de linhas de soldadura e c) formação de linhas de união [4].

1.4.3.4 MARCAS DEVIDO AO EFEITO JATO

As marcas na superfície das peças devido ao efeito de jato (Figura 28) são resultantes de elevadas velocidades de escoamento através de ataques com área projetada reduzida para zonas da moldação sem obstáculos. Nestas situações, a primeira frente de fluxo é projetada para longe do ataque, dando origem a um enchimento heterogêneo e descontínuo da cavidade moldante [4,7]

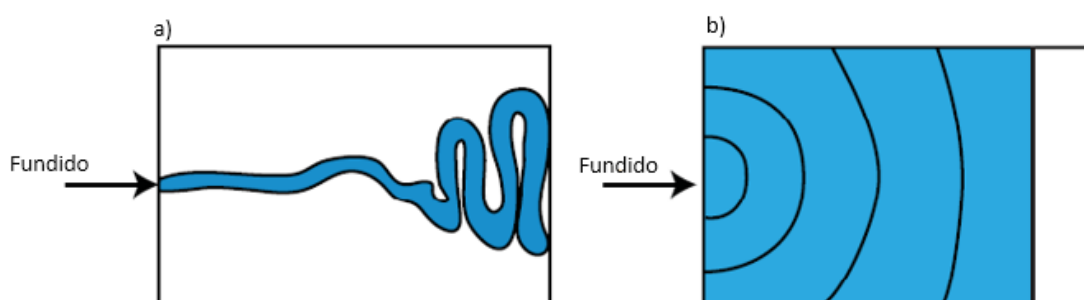


Figura 28 – a) Efeito de jato e b) enchimento ideal da cavidade com frente de fluxo contínua radial ou paralela [4].

Este defeito pode ser evitado através de utilização de obstáculos à entrada da cavidade moldante ou através do aumento das dimensões do ataque de forma a favorecer a formação de uma frente de fluxo contínua e radial ou paralela de material (Figura 29) [4,7].

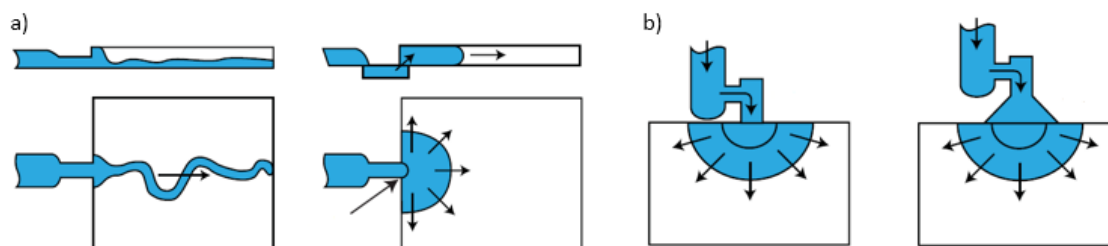


Figura 29 – Efeito da a) alteração da posição e b) da geometria do ataque no efeito de jato [4].

1.4.3.5 HESITAÇÕES

Este defeito é o resultado da alteração da velocidade das linhas da frente de fluxo no interior das cavidades moldantes (Figura 30) devido, geralmente, a variações na espessura da peça. Com efeito, zonas mais finas apresentam velocidades de arrefecimento e resistência ao fluxo do fundido maiores e, por isso, tendem a apresentar marcas na superfície das peças resultantes da formação de uma frente de fluxo não uniforme durante o enchimento da cavidade moldante [4,7]. Este tipo de defeito poderá ser evitado através da alteração da posição e/ou do número de ataques de forma a garantir um enchimento mais uniforme de toda a cavidade moldante.

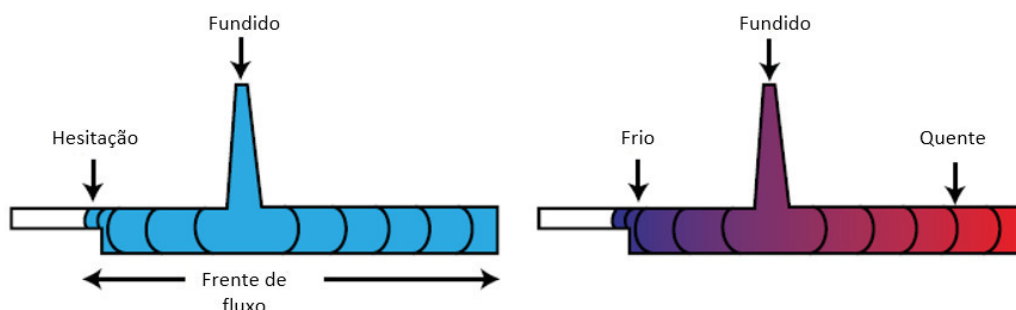


Figura 30 – Hesitações resultantes da variação da espessura da peça.

1.4.3.6 PRISÕES DE AR

A formação de poros no interior das peças resulta frequentemente da convergência de frentes de fluxo que aprisiona ar do interior da massa fundida, impedindo que este saia através do sistema de escape de gases do molde [4].

1.4.3.7 EMPENO

A principal causa do empeno das peças são tensões geradas por contrações não uniformes devido a diferenças na orientação molecular, no grau de compactação ou devido a gradientes de temperatura gerados durante o arrefecimento [4,13].

1.4.4 A “JANELA” DE MOLDAÇÃO POR INJEÇÃO

Dois dos parâmetros de processamento que mais afetam a qualidade dos produtos obtidos por injeção de termoplásticos são a temperatura de injeção e a pressão de compactação. O conjunto de valores destes parâmetros que permitem a produção de peças com as características desejadas definem uma “janela” de moldação por injeção (Figura 31) cujos limites dependem da peça a produzir e do polímero a injetar [14].

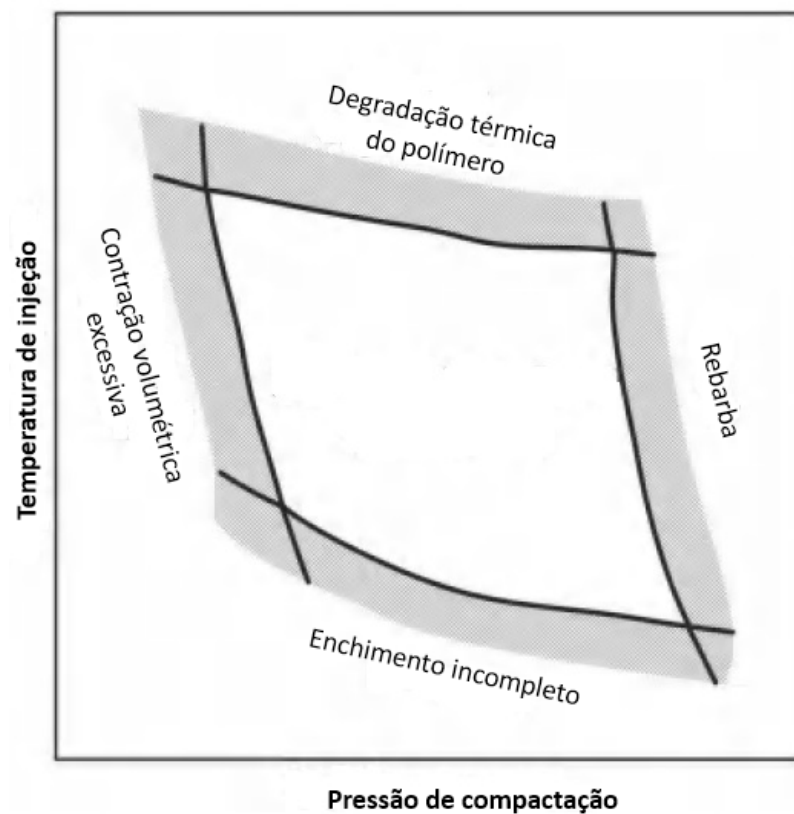


Figura 31 – A “janela” de moldação por injeção [14].

1.5 O POLÍMERO ABS (ACRILONITRILÓ-BUTADIENO-ESTIRENO).

Um dos termoplásticos mais utilizados na indústria automóvel é o acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS). Trata-se de um copolímero amorfo obtido através de polimerização do acrilonitrilo e estireno na presença de polibutadieno. Embora as propriedades deste material dependam da quantidade relativa de cada um dos monómeros (Figura 32), as suas características típicas são a grande estabilidade dimensional e a elevada resistência química, ao impacto, ao calor e à abrasão. No entanto, a sua utilização não é indicada para aplicações que requerem uma elevada resistência à fadiga e um reduzido coeficiente de atrito. As principais aplicações do ABS são a produção de peças para a indústria automóvel (maioritariamente no seu interior), carcaças para televisores, telefones, aspiradores, computadores e outros eletrodomésticos [15].

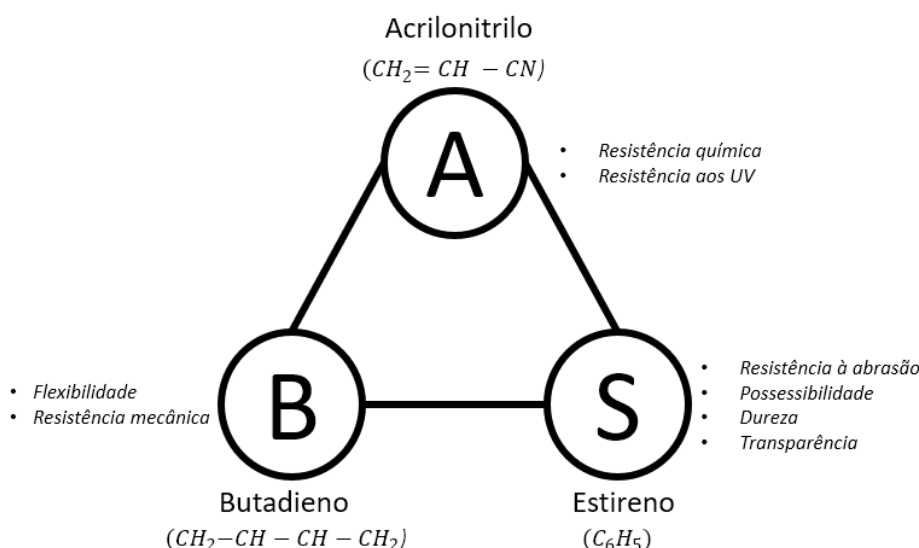


Figura 32 – Contribuição de cada monómero para as propriedades do ABS [15].

1.6 O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.

Devido aos elevados custos do equipamento de injeção, moldes e equipamentos auxiliares, a moldagem por injeção é geralmente utilizada na produção de séries constituídas por um elevado número de peças. Mesmo destes casos, a viabilidade económica do processo depende fortemente da otimização das condições de injeção (temperatura, pressão, velocidade de injeção, etc.) e do molde (sistema alimentação, arrefecimento, extração, etc.), tendo em conta as propriedades do polímero a injetar e a forma, dimensões, tolerância dimensional e qualidade da superfície da peça pretendida, de forma a minimizar o tempo total de ciclo de injeção e não comprometer a qualidade da peça final.

Devido ao elevado número de parâmetros do processo e das dependências entre eles, a otimização do processo envolve cada vez mais o recurso a técnicas de simulações numéricas progressivamente mais complexas e precisas. Entre estas técnicas computacionais, destaca-se o método dos elementos finitos (MEF). De uma forma genérica, este método permite a obtenção de soluções numéricas de equações integrais ou diferenciais que descrevem problemas de engenharia, tais como a análise de tensões, temperatura, escoamentos de fluidos e aerodinâmica, interação eletromagnética, etc. [16].

O princípio fundamental do MEF é a divisão (discretização) da peça em elementos menores (elementos finitos) ligados por nós (Figura 33) e obter-se uma solução global aproximada a partir da solução numérica de um conjunto de equações que traduzem o comportamento do material em cada um dos elementos finitos definidos anteriormente [17].

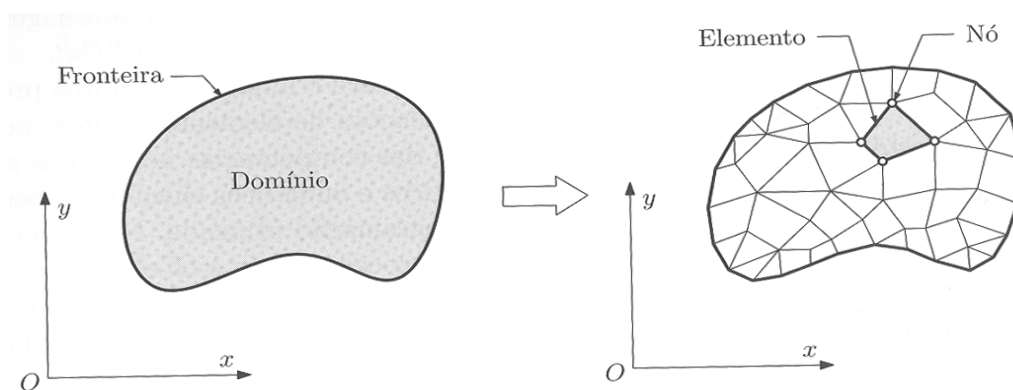


Figura 33 - Representação esquemática do processo de discretização de um domínio em elementos finitos [17].

Dependendo do problema e da precisão pretendida, os elementos finitos podem assumir diversas formas geométricas, tais como as que são apresentadas na Figura 34. No caso da moldagem por injeção de polímeros termoplásticos, a otimização do processo por MEF deverá considerar um conjunto de fenômenos relativamente complexos (que inclui o escoamento de fluidos e a transferência de calor) tendo em conta uma grande variedade de parâmetros (tais como o efeito da temperatura e pressão na viscosidade e no escoamento) e variação destes parâmetros em cada ponto da peça e ao longo do processo de injeção, características do polímero a injetar e do molde (forma e dimensão da cavidade e sistema de alimentação, eficiência do sistema de arrefecimento, etc.) [17].

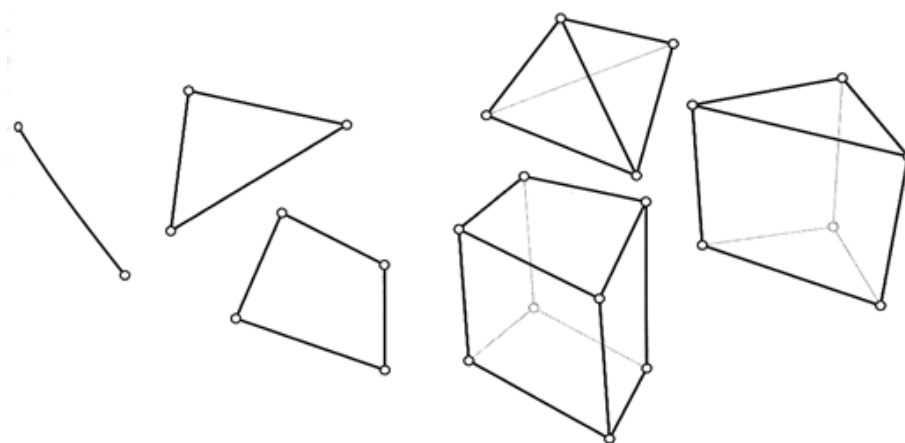


Figura 34 - Exemplos de formas geométricas possíveis para elementos finitos [17].

1.7 A EMPRESA PRINEMO.

A empresa PRINEMO está localizada em Cacia, Aveiro e desde que foi fundada em 2015 integra, juntamente com as empresas TECMA, MOP, J. PRIOR, FUNDIFÁS, PRIREV e PRILUX, o grupo PRIFER (Figura 35). Este grupo possui como atividade principal a conceção, produção de moldes e produção de peças poliméricas e metálicas por moldagem por injeção [18]. Cada empresa tem uma área de negócios distinta: a TECMA (Le Mans, França) é responsável pela Gestão global de projetos de molde, a J. Prior (Vagos, Aveiro) pela moldagem por injeção e extrusão de peças poliméricas e respetiva montagem, a FUNDIFÁS (Águeda, Aveiro) produz peças em alumínio e Zamak e acabamentos de superfície, a PRIREV (Vagos, Aveiro) deposita revestimentos técnicos e faz tratamentos de superfície em peças metálicas, a PRILUX produz sistema de irrigação e estugas (Vagos, Aveiro), a MOP (Leiria) produz moldes de injeção plástico e a PRINEMO tem como função desenvolvimento de produto [18]. Mais especificamente, a PRINEMO tem como objetivo principal solucionar problemas de moldagem por injeção através de ferramentas de software de simulação e de modelação 3D, com a capacidade em modelar, para além de componentes poliméricos para indústria automóvel, componentes eletrónicos, peças obtidas por enformação de chapas metálicas, etc., tendo também vertente de consultadoria técnica de moldes. Oferecendo um conjunto de serviços especializados de engenharia, com especial ênfase na produção por injeção de peças para o interior de automóveis e componentes de engenharia em polímero [19].

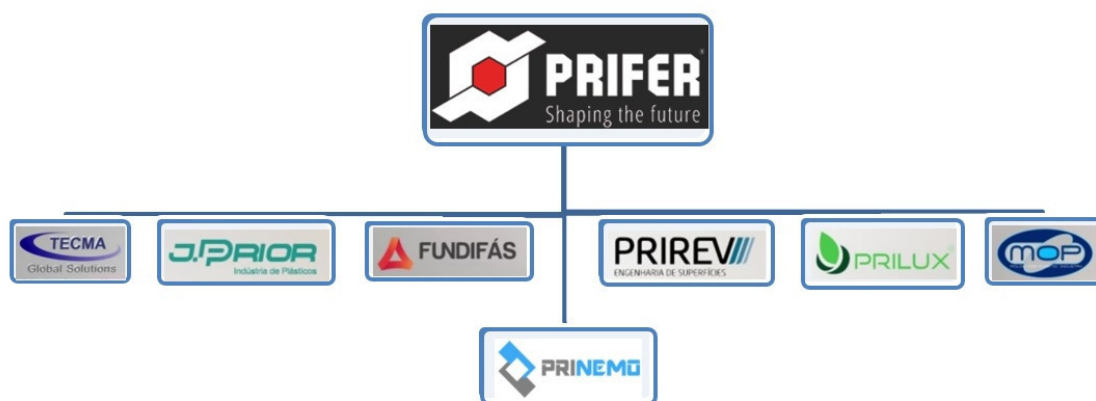


Figura 35 – Empresas do grupo PRIFER

2 REALIZAÇÃO EXPERIMENTAL.

No decorrer do estágio curricular, que decorreu na empresa Prinemo, tive a oportunidade de estar envolvido em todo o processo de conceção de moldes e de análise do processo de moldagem por injeção de polímeros termoplásticos utilizando o método dos elementos finitos, desde a modelação 3D e discretização das peças e moldes até à definição das condições de injeção, simulação e análise dos resultados.

A integração na empresa durante do estágio, que numa fase inicial envolveu a formação intensiva na utilização do software necessário à realização do trabalho, não passou apenas pelo contato com as diferentes etapas do processo análise do processo de moldagem por injeção, mas incluiu também a adaptação à cultura da empresa, cumprimento de horários, relacionamento com os colaboradores e serviços administrativos, etc.

O estudo realizado no âmbito do estágio teve como objetivo principal a análise baseada no MEF do processo de moldagem por injeção de peças em ABS produzidas para a indústria automóvel (Figura 36), para compreender a origem e propor soluções que permitissem evitar os defeitos de rebarba e de chupado exibidos pelas referidas peças. De referir que o primeiro tipo de defeitos foi observado em todas as peças, mas que o segundo tipo foi apenas observado na zona mais afastada dos ataques das peças maiores (Figura 37).

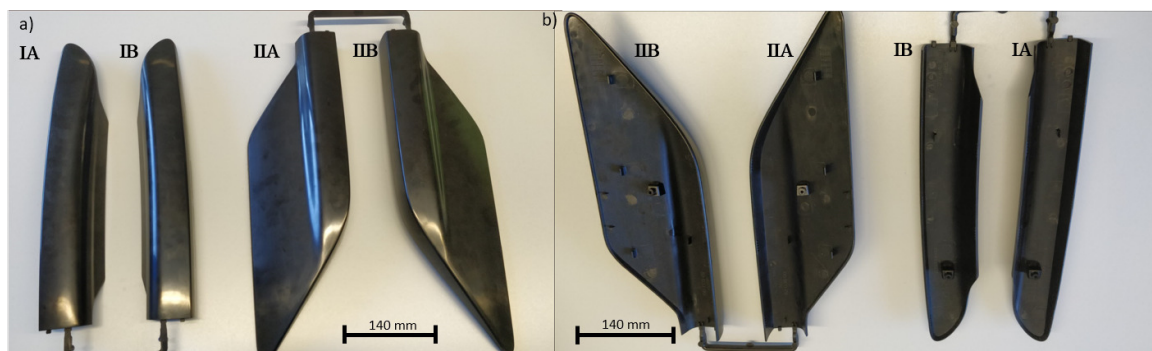


Figura 36 – Peças estudadas neste trabalho. a) Faces frontais e b) faces contrárias. Nas imagens são também visíveis os gitos correspondentes aos canais frios que constituem o sistema de alimentação utilizado na produção das peças.

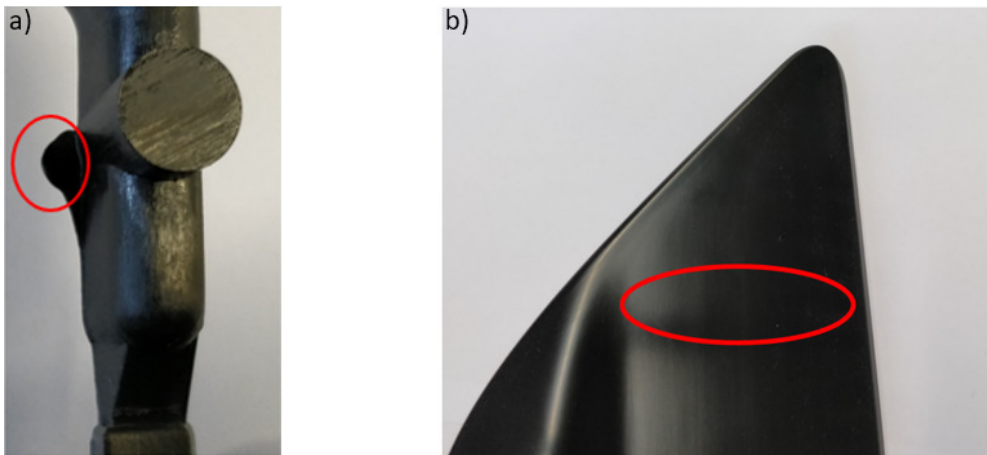


Figura 37 - Defeitos (identificados com as linhas vermelhas) de a) rebarba e b) chupado nas peças estudadas.

O estudo realizado envolveu as seguintes etapas:

- a) Identificação da origem dos defeitos através da análise do processo (molde e condições de injeção) utilizado atualmente na produção das peças em estudo;
- b) Apresentação de propostas de correção ao molde atualmente utilizado na produção das peças, que permitisse reduzir a incidência dos referidos defeitos;
- c) Conceber um novo molde que incorporasse soluções mais eficientes de moldagem por injeção das peças com as características desejadas.

Para o efeito, foi realizada a modelação 3D das cavidades moldantes das peças, a descritização dos modelos obtidos, definição do sistema de alimentação, definição das características do material a injetar e das condições de processamento, simulação utilizando o MEF do processo de injeção e análise dos resultados. O software de simulação utilizado foi o Autodesk Moldflow Insight 2010, que foi executado num computador com processador Intel® Xeon® CPU E3-1245 v5 @ 3.50 GHz, com 32 GB de RAM, sistema operativo Windows 10 de 64 bits e placa gráfica NVidia Quadro K620 versão 369.09.

É de referir que durante o estágio, para além do trabalho anteriormente referido, tive também a oportunidade de efetuar um estudo comparativo de desempenho de dois softwares comerciais de simulação do processo de injeção de polímeros termoplásticos: o Autodesk Moldflow e o Simcon Cadmould. Este estudo envolveu a simulação, com ambos os softwares, do processo de moldagem por injeção de um painel para a indústria automóvel utilizando quatro materiais diferentes (polipropileno, polipropileno com 20% de talco, mistura de ABS e policarbonato e poliamida 66 com 20% de fibra de vidro) e teve em conta o preço das licenças, facilidade de operação, tempos de

execução e qualidade das previsões durante as etapas de enchimento, compactação e arrefecimento da evolução da frente de fluxo, pressões de injeção e no interior das cavidades do molde, forças de fecho do molde, velocidade de escoamento, contração volúmica e empenos das peças, etc. Os resultados obtidos permitiram à empresa tomar uma decisão fundamentada sobre a política a seguir no futuro próximo relativamente à aquisição de licenças do software a utilizar para simular o processo de injeção de polímeros.

2.1 MODELAÇÃO 3D DA CAVIDADE MOLDANTE E SUA DISCRETIZAÇÃO

Os modelos tridimensionais das peças estudadas (Figura 38) foram obtidas a partir das cavidades moldantes definidas em ficheiro do modelo 3D do molde utilizado na produção das mesmas (Figura 39).

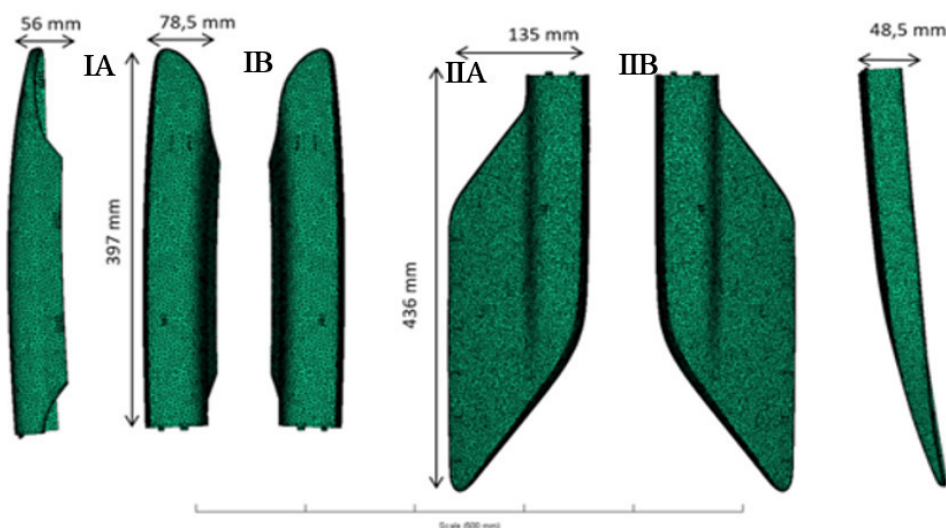


Figura 38 – Modelo 3D das peças estudadas.

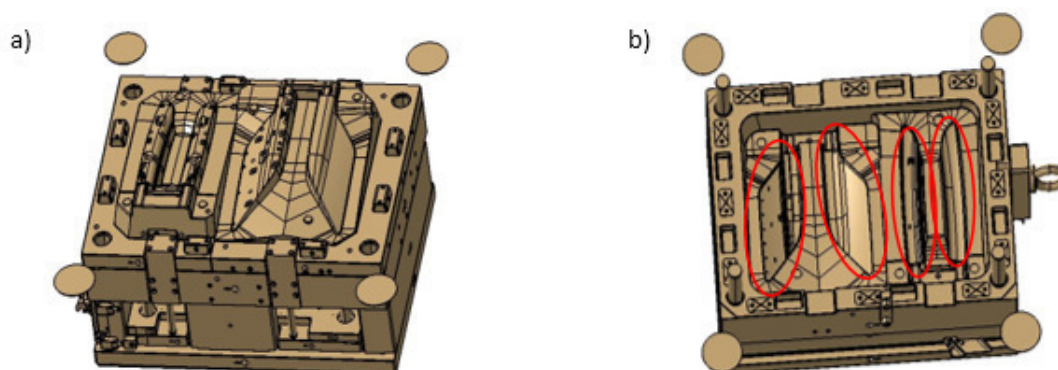


Figura 39 - Placas constituintes do molde utilizado na produção por injeção das peças estudadas. As linhas vermelhas em b) definem a cavidade moldante das peças.

A partir dos modelos 3D das peças foram definidos 2 tipos distintos de malhas:

- a) Malha 2D (“dual domain”) obtida da união de elementos bidimensionais (triângulos), de forma a definir a superfície das peças. Este tipo de malha permite reduzir substancialmente o tempo de cálculo de cada simulação, mas possibilita apenas uma análise relativamente grosseira do processo de injeção.
- b) Malha 3D definida pela sobreposição de várias camadas de elementos tridimensionais (tetraedros) em todo volume do modelo que define a peça. Esta malha é mais adequada para uma análise detalhada e precisa do processo de moldagem por injeção, mas aumenta substancialmente o tempo de cálculo de cada simulação.

A malha 2D foi gerada automaticamente pelo software utilizando elementos com comprimento médio de aresta com 3,3 mm e posteriormente otimizada de forma a garantir a conectividade das arestas dos elementos (eliminando arestas livres e sobreposição de elementos) e um valor de razão de aspeto máximo de 19,99. O valor do parâmetro de qualidade da malha obtida foi de 92,5% (o valor mínimo indicado é 85%). Com a malha otimizada foi realizada uma análise de forma a identificar zonas de espessura muito reduzida que, por serem de preenchimento mais difícil e de arrefecimento mais rápido, pudessem apresentar um enchimento incompleto. Esta análise permitiu verificar que a espessura mínima (0,2 mm) ocorria as paredes de saliências do sistema de fixação existente nas faces contrárias das peças (Figura 40). A maior dificuldade de injeção destas saliências é testemunhada pelo enchimento incompleto destas zonas na maioria das peças produzidas. A partir da malha 2D, foi gerada automaticamente a correspondente malha 3D que foi utilizada nas simulações numéricas efetuadas.

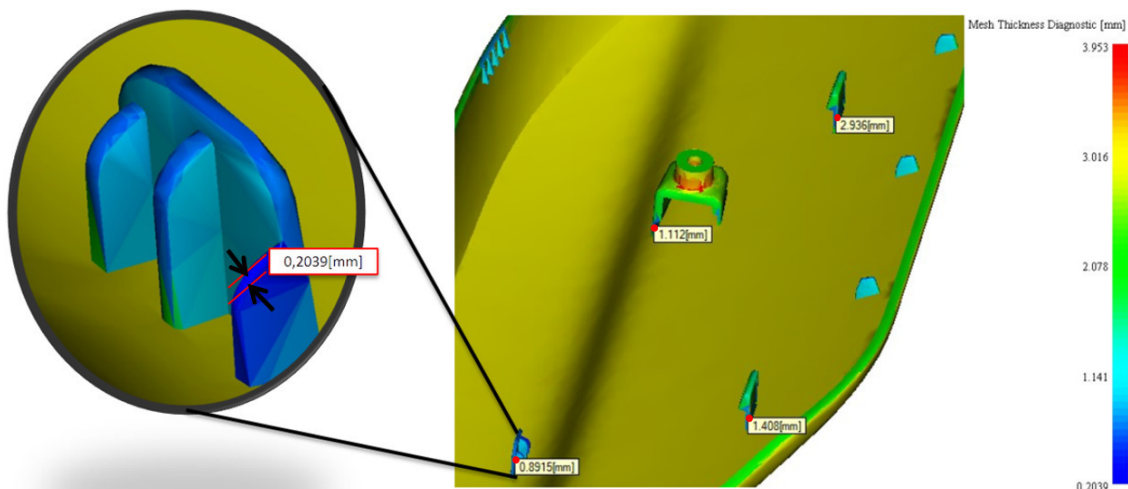


Figura 40 – Pormenores da face não visível (zona técnica) de uma peça grande.

2.2 MODELAÇÃO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO.

A modelação do sistema de alimentação original teve também como ponto de partida o ficheiro com o modelo 3D do molde. Este sistema de alimentação é constituído por canais quentes e frios, onde o canal principal quente (com 14 mm de diâmetro) é dividido em dois que distribuem o polímero por cada par de peças simétricas (Figura 41). Nos terminais dos canais quentes foram definidas válvulas com obturador. Após estes pontos, cada canal quente subdivide-se em dois canais frios, cujas extremidades terminam em ataque do tipo lâmina para alimentação das cavidades moldantes de cada uma das peças. Na Tabela 2 são apresentadas as características principais do sistema de alimentação são apresentadas.

Após definição do sistema de alimentação, foi efetuado um diagnóstico de conetividade dos diferentes elementos constituintes, para verificar se todos os canais de alimentação se encontravam ligados entre si.

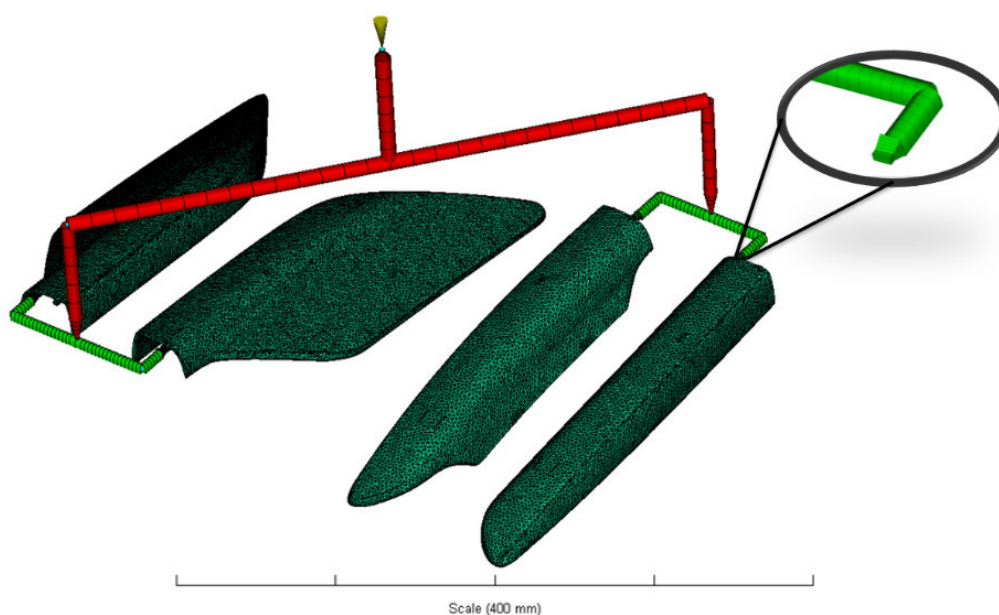
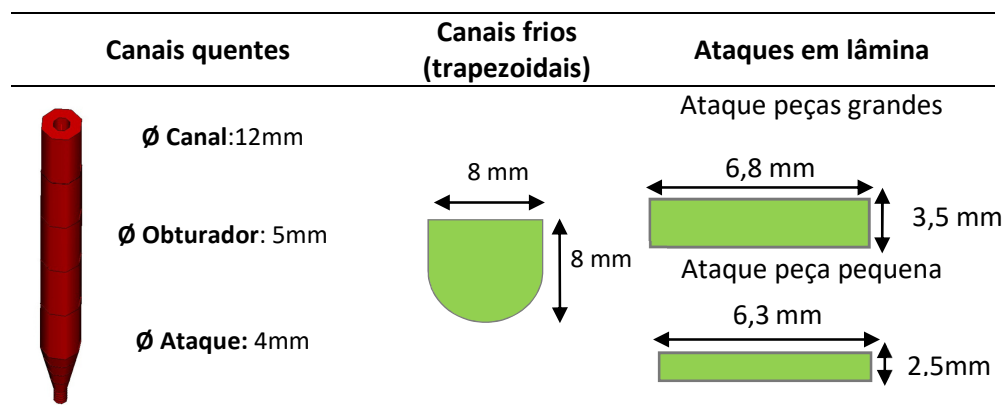


Figura 41 – Cavidades moldantes e sistema de alimentação utilizados na produção das peças estudadas. Os canais a vermelho e a verde correspondem a, respetivamente, canais de alimentação quentes e frios. Na imagem também é apresentada o pormenor o ataque em lâmina de uma peça.

Tabela 2 – Características do sistema de alimentação do molde utilizado na produção das peças estudadas.



2.3 CARACTERÍSTICAS NO POLÍMERO INJETADO

O material utilizado na produção das peças estudadas foi o copolímero de acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), produzido pela empresa BASF com a referência Terluran HH-112. As principais características e as condições de injeção indicadas pelo produtor para este material são apresentadas nas Tabela 3 e Tabela 4, respetivamente.

Tabela 3 - Características principais do polímero ABS, referência Terluran HH-112 [20].

Property Description	Method	Units	Terluran® HH-112 ABS
Density	ASTM D1505	g/cm ³	1.06
Melt Volume Rate (Melt Flow Index) 220°C/10kg	ASTM D1238	ml/10 min.	6.00
Tensile Strength at Yield, v=50 mm/min	ASTM D638	psi (MPa)	8,400 (58)
Elongation at Yield	ASTM D638	%	3.0
Tensile Strength at Break, v=50 mm/min	ASTM D638	psi (MPa)	5,700 (39)
Tensile Modulus	ASTM D638	psi (MPa)	406,000 (2,800)
Flexural Strength	ASTM D790	psi (MPa)	12,800 (88)
Flexural Modulus	ASTM D790	psi (MPa)	392,000 (2,700)
Notched Izod Impact Strength, 0.125" 73°F (23°C) -22°F (-30°C)	ASTM D256	ft.lbs./in. (J/m)	1.9 (100) 1.0 (55)
Heat Deflection Temperature at 1.8 MPa (HDT A) 4hrs. at 80°C	ISO 75-2	°F (°C)	228 (109)
Heat Deflection Temperature at 0.45 MPa (HDT B) 4hrs. at 80°C	ISO 75-2	°F (°C)	237 (114)
Vicat Softening Temperature, Rate A, Loading 2	ASTM D1525	°F (°C)	234 (112)

Tabela 4 – Condições recomendadas para a moldagem por injeção do ABS Terluran HH-112 [13,20].

Temperatura de injeção	Temperatura do molde	Temperatura de extração	Velocidade máxima de deformação de corte
230 - 270 °C	30 - 60 °C	105 °C	50000 1/s

As relações entre a temperatura, pressão, volume, viscosidade, etc. são parâmetros muito importante para prever corretamente o comportamento do material durante o processo de injeção. No caso do ABS Terluran HH-112, foram utilizados os valores definidos em biblioteca própria do software Autodesk Moldflow. A título de exemplo, são apresentadas na figura seguinte os valores de viscosidade para diferentes temperaturas e velocidades de deformação de corte utilizados neste trabalho.

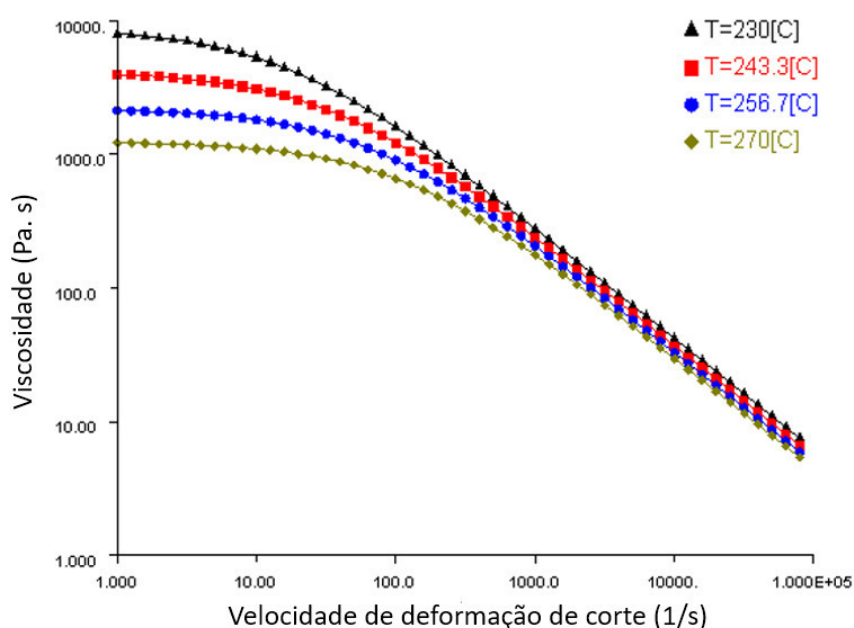


Figura 42 - Gráfico representativo da viscosidade com a velocidade de deformação de corte em várias temperaturas do ABS – Terluran HH-112, BASF [13].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISE DO PROCESSO DE INJEÇÃO ATUAL

A tabela seguinte reúne os principais parâmetros do processo de moldagem por injeção utilizados na produção das peças estudadas.

Tabela 5 - Parâmetros do processo de moldagem por injeção utilizados na produção das peças estudadas.

Tempo de enchimento	Tempo de compactação	Ponto de comutação (% do volume total)	Pressão máx. de injeção	Pressão de compactação	Temperatura do molde	Temperatura de injeção
7,8 s	12 s	99,50 %	131 MPa	85 MPa	50 °C	250 °C

A evolução do processo durante as etapas de enchimento das cavidades moldantes das peças e de compactação foi imposta pelo avanço do parafuso da máquina injetora após o fecho do molde. A partir de uma posição inicial de 115 mm (posição durante a etapa de plasticização), o enchimento das cavidades moldantes com o polímero fundido ocorreu por ação do avanço do referido parafuso em 3 estágios sequenciais distintos (Figura 43), nomeadamente:

- Uma etapa inicial de avanço de 44 mm (115 mm – 71 mm) com uma velocidade de 8 mm/s, de forma a promover o preenchimento dos canais de alimentação e iniciar o enchimento das cavidades moldantes. Nesta etapa é imposta uma taxa de deformação de corte relativamente reduzida e é promovida uma velocidade de enchimento da cavidade moldante mais uniforme.
- Uma segunda etapa, correspondente ao enchimento quase completo das cavidades moldantes das peças, em que o parafuso avançou 50 mm (71mm – 21 mm) com uma velocidade de 40 mm/s;
- Uma etapa final de enchimento das cavidades moldantes a uma velocidade de avanço do parafuso mais reduzida (30 mm/s) com o objetivo de facilitar a saída de gases e evitar defeitos associados nas peças.

É de referir que foi durante esta última etapa que se registou o maior valor de pressão no bico de injeção (131 MPa). A força máxima de fecho do molde (força necessária aplicar para

compensar a pressão exercida pelo polímero líquido nas cavidades do molde e que tende a separar as placas constituintes do molde) do equipamento utilizado foi 11,27 MN.

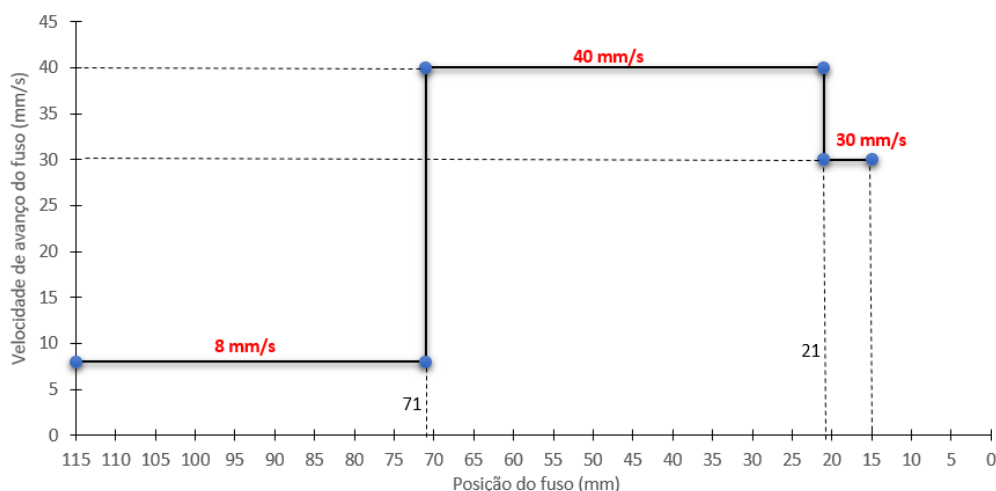


Figura 43 – Posição e velocidade de avanço do parafuso da máquina injetora durante a etapa de enchimento das cavidades do molde.

Após o enchimento das cavidades do molde com o polímero fundido, ocorreu o início da etapa de compactação. A partir deste instante (ponto de comutação), que coincidiu com o preenchimento de 99,5% do volume total das cavidades do molde, o movimento do parafuso passou a ser controlado pelo valor de pressão no bico de injeção. No caso atual, foi utilizada uma pressão de compactação constante de 85 MPa durante 10 segundos, através do avanço de 9 mm (15 mm – 6mm) do parafuso da máquina injetora. A distância mínima do parafuso da sua posição limite (6 mm) define o volume da almofada de material utilizada no processo. A etapa de compactação terminou com a diminuição da pressão de compactação durante um período de 2 segundos (Figura 44). Contabilizando também o tempo de abertura e fecho do molde (19 s), o tempo total de ciclo de injeção utilizado na moldagem das peças foi de 73,8 s (7,8+12+35+19).

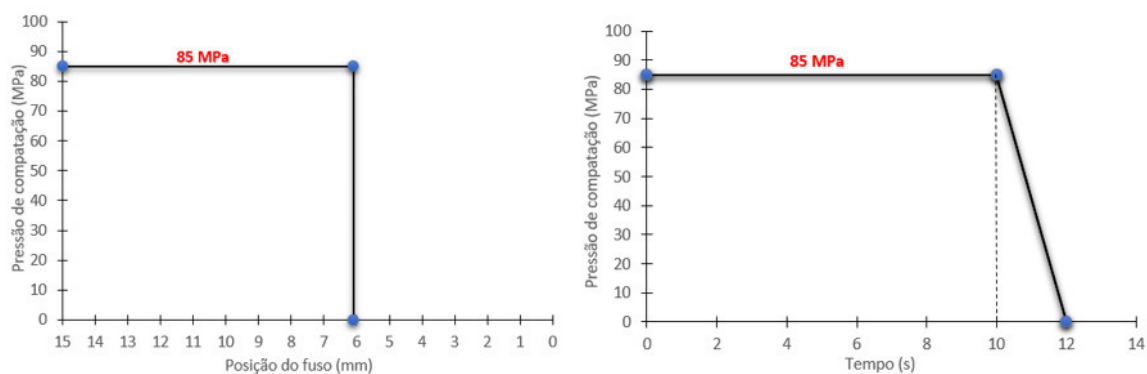


Figura 44 – a) Posição do parafuso da máquina injetora e b) pressão no bico de injeção durante a etapa de compactação.

Em anexo são apresentados outras condições de injeção utilizadas nas simulações efetuadas, bem como alguns resultados obtidos neste trabalho. Com base nestes dados, foram realizadas simulações pelo MEF do processo de injeção das peças, de forma a identificar a origem dos defeitos (rebarba e chupado) e propor soluções para os mesmos. Os parâmetros analisados com maior detalhe nestas simulações foram o tempo de enchimento das cavidades moldantes das peças, a evolução da pressão no bico de injeção (pressão máxima de injeção) e no interior da cavidade do molde, a força de fecho do molde, a velocidade de deformação de corte e a contração volumétrica da peça durante o arrefecimento. Os parâmetros iniciais utilizados nestes cálculos encontram-se na tabela seguinte.

Tabela 6 - Parâmetros iniciais utilizados na simulação do processo atual de injeção das peças.

Tempo de enchimento	Tempo de compactação	Ponto de comutação (% do volume total)	Pressão de compactação	Temperatura do molde	Temperatura de injeção
7 s	12 s	99,50 %	85 MPa	50 °C	250 °C

Na tabela e figuras seguintes são apresentados, respetivamente, a duração da etapa de enchimento de cada peça e a evolução da posição da frente de fluxo do polímero fundido durante o processo de injeção obtidas na simulação realizada. A análise destes resultados permite verificar que o enchimento das cavidades moldantes das peças menores (peças IA e IB) é mais rápido do que o das peças maiores (peças IIA e IIB). Em termos da evolução da posição da frente do fluxo, a simulação numérica (Figura 45) não prevê a ocorrência de hesitações, mas mostra que deverá verificar-se uma aceleração mais acentuada da frente de fluxo do polímero fundido na fase final do

enchimento da zona moldante das peças maiores (traduzido por um aumento da separação das linhas de fluxo na extremidade das peças mais afastada do ataque).

Tabela 7 – Duração prevista pela simulação numérica para a etapa de enchimento de cada peça.

Peças	Duração da etapa de enchimento (s)
IA	7,55
IB	7,55
IIA	7,70
IIB	7,70

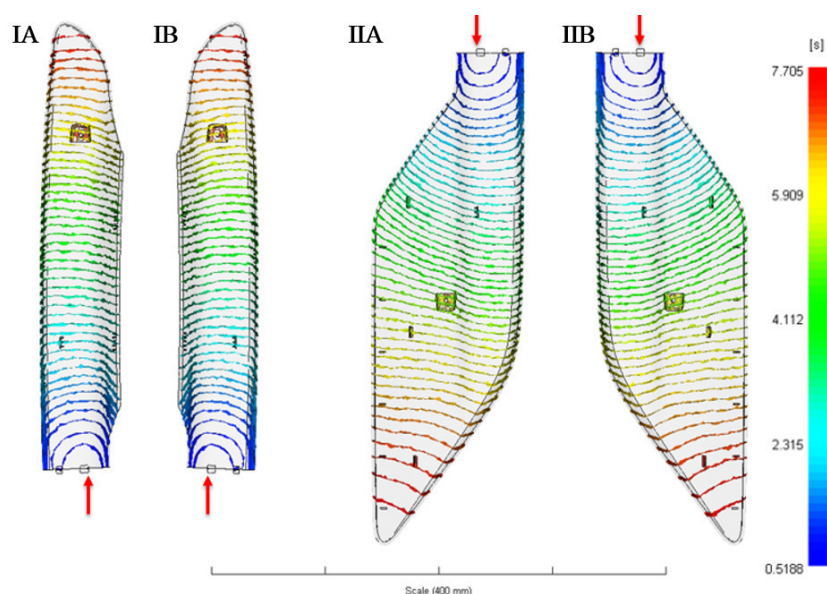


Figura 45 -Evolução prevista pela simulação numérica para a posição da frente de fluxo do polímero durante a etapa de enchimento das cavidades moldantes das peças.

Esta diferença na duração da etapa de enchimento é também confirmada pela evolução a pressão no interior da zona moldante imediatamente antes do início da etapa de compactação (Figura 46). Com efeito, a simulação mostra que no ponto de comutação todo o volume da cavidade moldante das peças pequenas se encontra completamente preenchido, registando-se uma pressão de aproximadamente 56 MPa na extremidade mais afastada dos ataques, enquanto que nas peças grandes o polímero ainda não atingiu esta zona das cavidades.

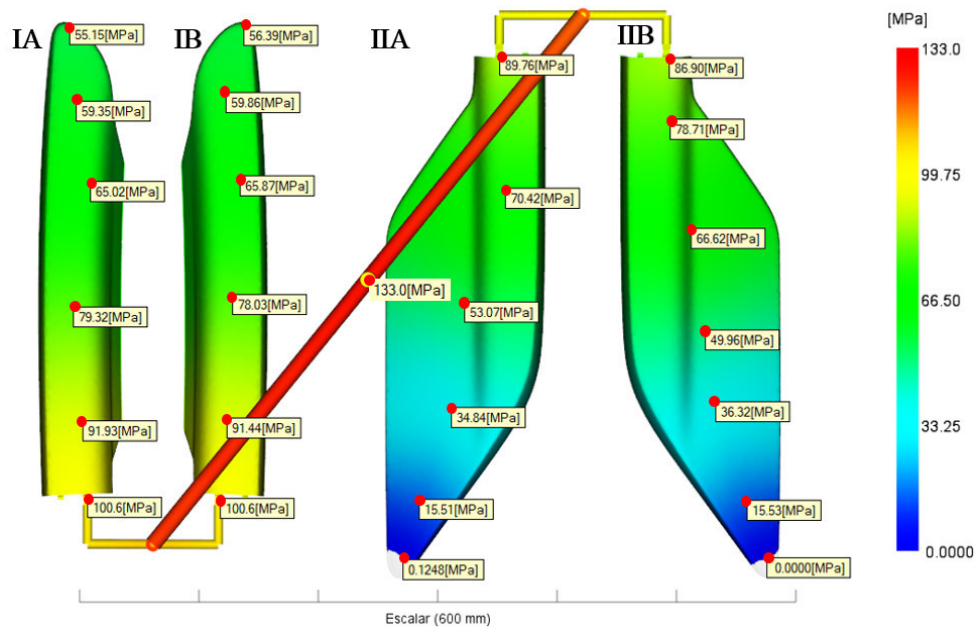


Figura 46 - Valores previstos pela simulação numérica para a pressão em diferentes pontos do interior das cavidades moldantes das peças no fim da etapa de enchimento.

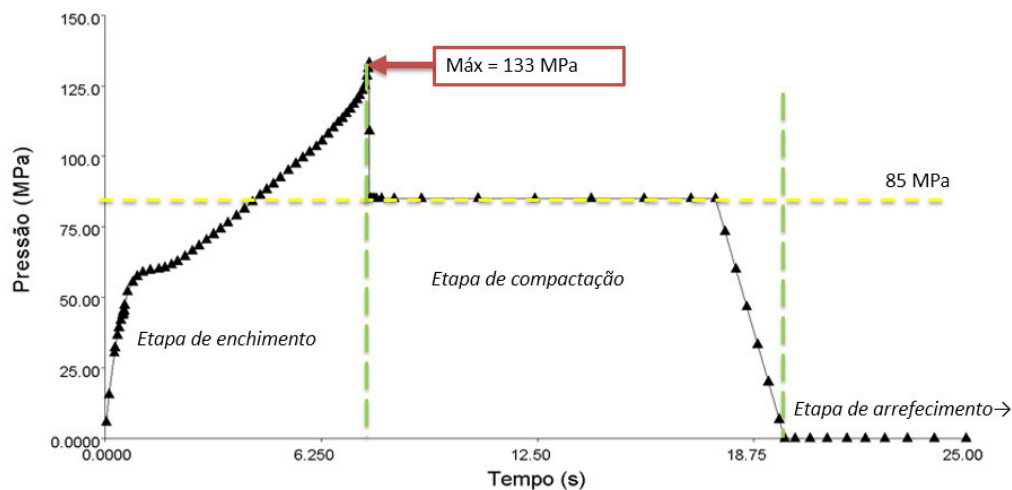


Figura 47 - Evolução prevista pela simulação numérica da pressão no bico de injeção.

É durante os instantes iniciais da etapa de enchimento das cavidades moldantes, junto às paredes dos ataques, que se verificou a maior velocidade de deformação de corte (29513 s^{-1}) que, no entanto, é inferior ao máximo indicado (50000 s^{-1}) para o polímero utilizado (ABS Terluran HH-112). No fim da etapa de enchimento, a pressão prevista no bico de injeção é de 133 MPa (Figura 47) valor quase coincidente com o valor de 131 MPa medido experimentalmente nesta zona (ver Tabela 5). Esta reduzida diferença de valores constitui uma evidência bastante forte da qualidade das previsões efetuadas pelo modelo numérico utilizado nas simulações realizadas, sugerindo que estas previsões podem ser utilizadas com bastante segurança para analisar o processo de injeção

das peças. Após a etapa de enchimento, segue-se a etapa de compactação durante a qual a pressão (85 MPa) é mantida constante durante 10 segundos e depois gradualmente reduzida.

A variação da pressão no bico de injeção é acompanhada por uma evolução semelhante da pressão nas zonas dos ataques das peças, como mostra a Figura 48. Nestes resultados é de destacar o maior valor de pressão no fim da etapa de enchimento (101 MPa) nos ataques das peças pequenas, tal como seria de esperar tendo em conta o enchimento completo mais rápido das cavidades destas peças.

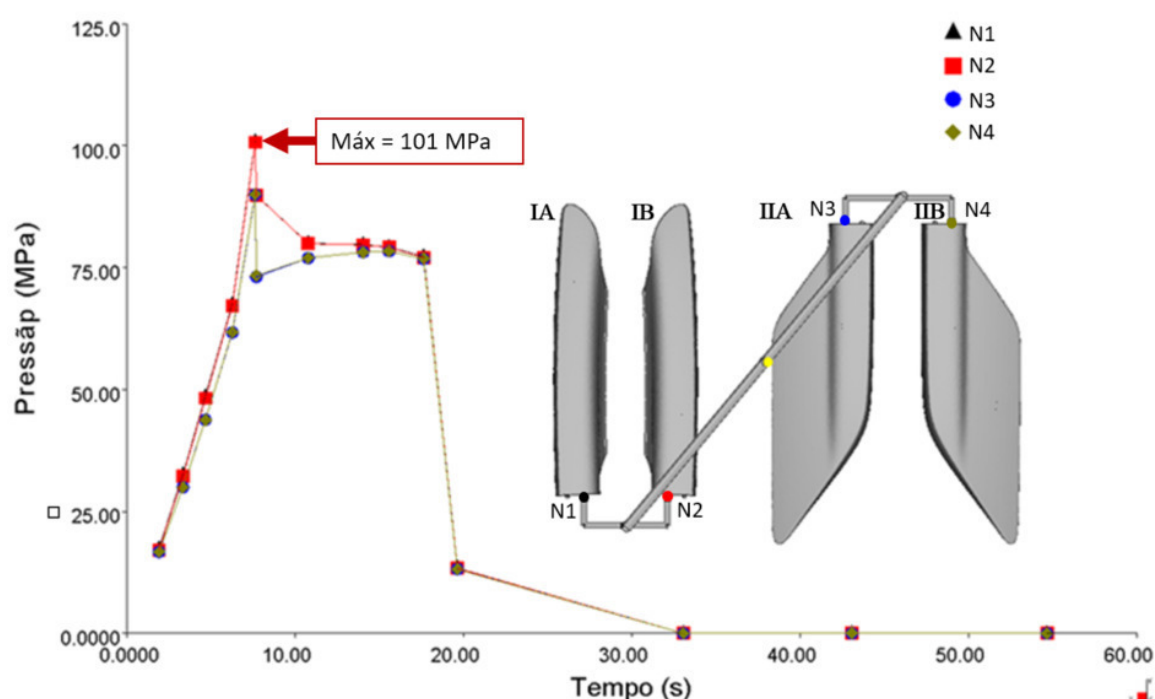


Figura 48 - Evolução prevista pela simulação numérica da pressão nas zonas dos ataques (cuja localização é identificada na figura) de cada peça.

Uma consequência direta do aumento da pressão nas cavidades do molde é a necessidade de ser aplicada uma força de fecho do molde crescente de forma a impedir a abertura deste durante a injeção (Figura 49). O valor máximo previsto (8,97 MN) define a força mínima que o sistema de fecho do molde deverá exercer durante o processo para impedir o escoamento do polímero líquido para fora do molde. Este valor é muito elevado, sendo relativamente próximo do valor limite da máquina de injeção utilizada (11,27 MN), e traduz uma situação em que a formação da rebarba é favorecida.

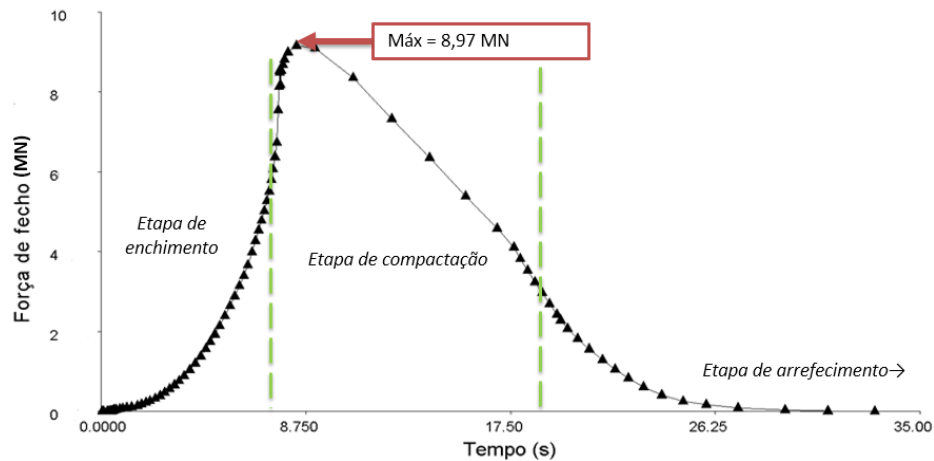


Figura 49 - Evolução prevista pela simulação numérica da força de fecho do molde.

Outro parâmetro importante que é possível obter nas simulações efetuadas é a contração volúmica da peça durante o processo de arrefecimento. Os valores médios (considerando toda a espessura) obtidos em diferentes pontos das peças (Figura 50) permitem verificar que a contração é mais acentuada nas extremidades opostas aos ataques, locais onde geralmente ocorrem defeitos de chupado. Isto sugere que os chupados exibidos pelas peças resultam das diferenças de contração ao longo da peça, devido a gradientes de compactação do material.

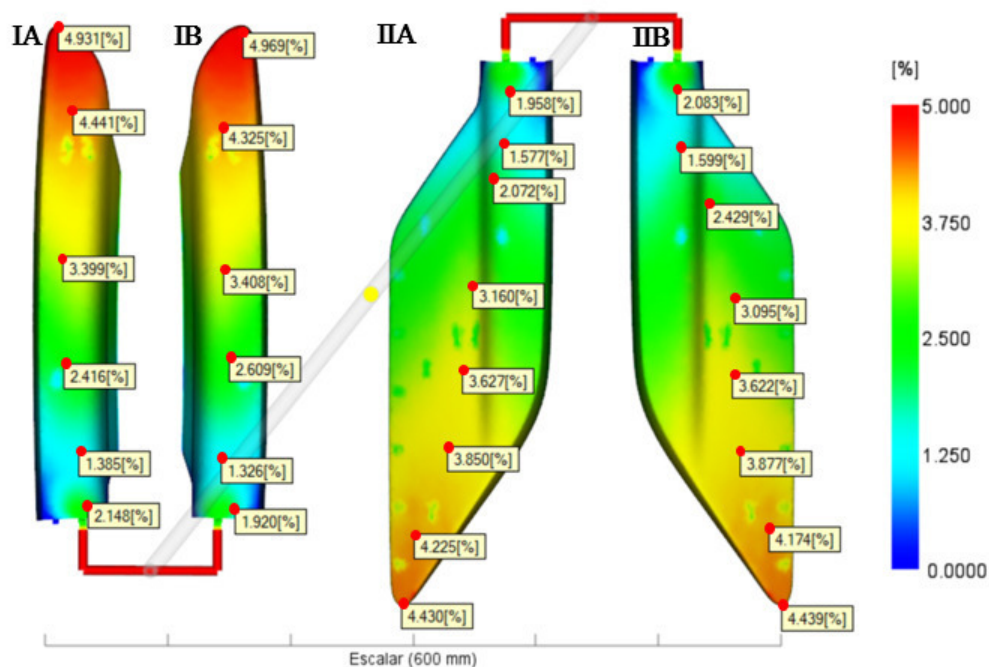





Figura 50 - Valores previstos pela simulação numérica para a contração volúmica média (ao longo da espessura) em diferentes pontos das peças.

3.2 PROPOSTA DE ALTERAÇÃO 1

Um dos principais resultados da secção anterior é a necessidade de ser utilizada uma elevada força para manter fechado o molde durante a injeção (8,97 MN) que traduz uma elevada pressão do polímero no interior das cavidades do molde, que favorece a formação de rebarba nas peças. Dado que esta força depende da pressão aplicada na etapa de compactação, procedeu-se a um novo conjunto de simulações numéricas pelo MEF do processo de injeção em que a pressão na etapa de compactação foi reduzida de 85 MPa para 60 MPa. Outro resultado que é importante na análise anterior é a diferença significativa de contração entre pontos diferentes das peças resultantes de gradientes de compactação que favorecem o desenvolvimento de defeitos de chupado. Na tentativa de reduzir este fenómeno, foram também efetuadas alterações aos ataques do modelo 3D utilizado no novo conjunto de simulações numéricas. Estas alterações consistiram em aumentar a área de secção reta dos ataques, com objetivo em melhorar a compactação no fim de todas as peças com a utilização de pressões de compactação menores, que passaram de uma secção retangular com 6,8 mm x 3,5 mm e 6,3 mm x 2,5 mm nas peças grandes e pequenas, respetivamente, para 25 mm x 1,5 mm (Tabela 8). Dado que a dimensão e posicionamento dos canais de alimentação não foram modificados, esta alteração implicou uma alteração da geometria dos ataques que passaram do tipo lâmina para o tipo leque (Figura 51). De referir que todas estas alterações propostas podem ser implementadas com relativa facilidade no molde existente, sem a necessidade de se investir num molde novo.

Tabela 8 - Características do sistema de alimentação considerado na proposta de alteração 1.

Canais quentes		Canais frios (trapezoidal)	Ataques em leque
	Ø Canal: 12mm	8 mm	
	Ø Obturador: 5mm		
	Ø Ataque: 4mm		

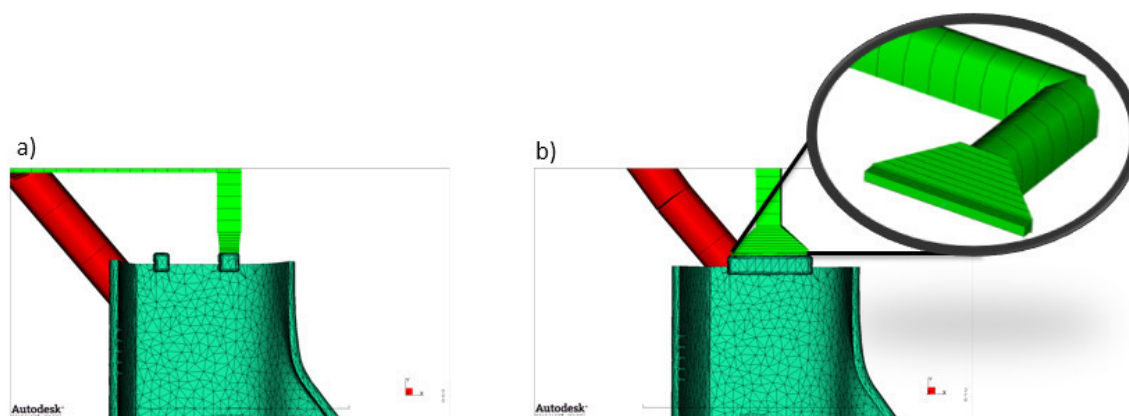


Figura 51 - Sistema de ataque a) em lâmina, utilizado atualmente na produção das peças e b) em leque, considerado na proposta de alteração 1.

Na Tabela 9 e Figura 52 e Figura 53 são apresentados o tempo previsto para a etapa de enchimento, o avanço da frente de fluxo do polímero líquido e a pressão em diferentes pontos das cavidades moldantes das peças no instante de comutação, respetivamente. Da comparação destes resultados com os apresentados na secção anterior, pode-se verificar que as alterações impostas ao molde têm um efeito marginal no processo de enchimento das cavidades moldantes, sendo a alteração mais significativa a redução menos acentuada de velocidade da frente do polímero durante o enchimento da cavidade das peças maiores. Relativamente à velocidade de deformação de corte máxima, o valor máximo (27436 s^{-1}) manteve-se inferior ao valor limite indicado para o polímero (50000 s^{-1}) e foi também obtido junto às paredes na zona do ataque.

Tabela 9 – Duração prevista pela simulação numérica para a etapa de enchimento de cada peça, considerando a proposta de alteração 1.

Peças	Duração da etapa de enchimento (s)
IA	7,54
IB	7,54
IIA	7,73
IIB	7,73

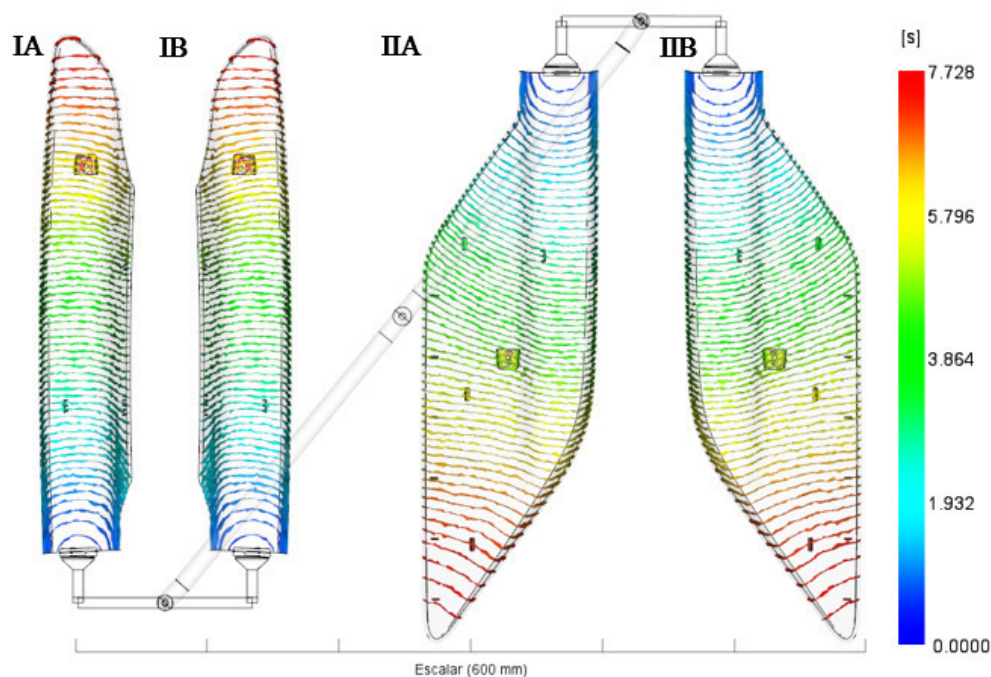


Figura 52 - Evolução prevista pela simulação numérica para a posição da frente de fluxo do polímero durante a etapa de enchimento das cavidades moldantes das peças, considerando a proposta de alteração 1.

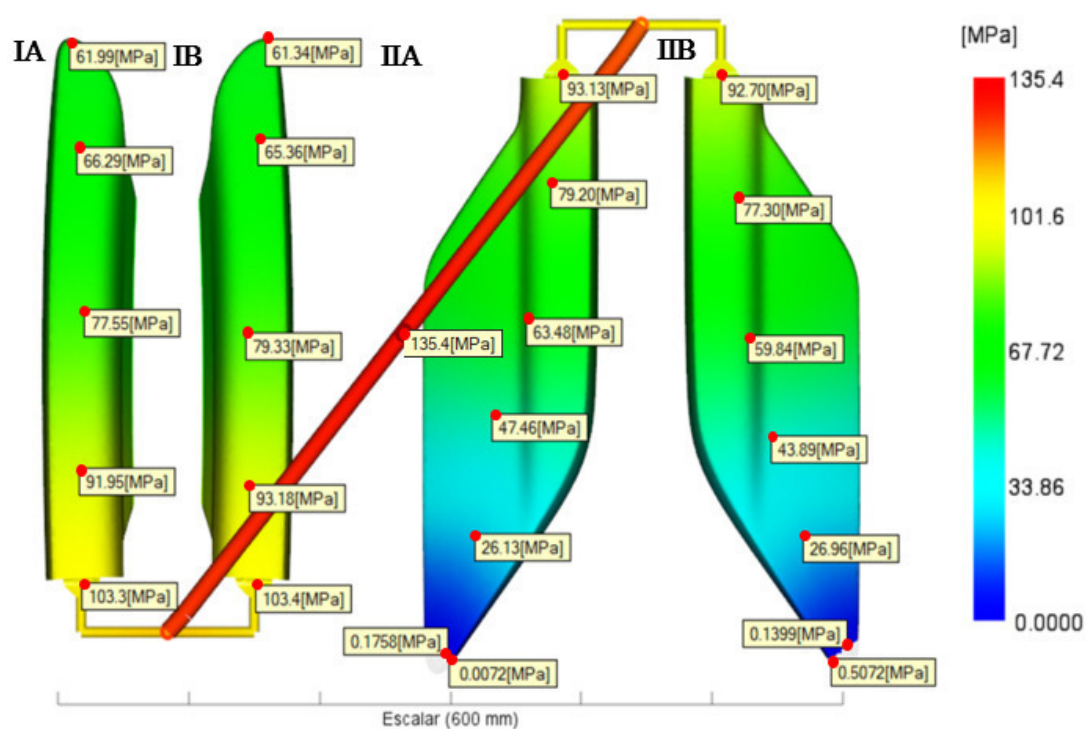


Figura 53 - Valores previstos pela simulação numérica para a pressão em diferentes pontos do interior das cavidades moldantes das peças no fim da etapa de enchimento, considerando a proposta de alteração 1.

De forma semelhante, a evolução durante a etapa de enchimento da pressão no bico de injeção (Figura 54) e na zona dos ataques (Figura 55) quase não é afetada e apenas durante a etapa de compactação se observa uma redução destes valores, justificada pela diminuição da pressão de compactação imposta nestes cálculos. Tal como era pretendido, a força máxima de fecho do molde diminuiu de 8,97 NM para 8,78 MN (Figura 56). No entanto, esta variação é também pouco significativa e não deverá contribuir de forma decisiva para a eliminação do defeito de rebarba nas peças. Além disso, a simulação numérica prevê um aumento das diferenças dos valores de contração volúmica em todas as peças (Figura 57) e, conseqüentemente, um agravamento dos defeitos de chupado observados nas mesmas. Este aumento dos valores absolutos e relativos da contração pode ser justificado pelo menor grau e homogeneidade da compactação do polímero devido à diminuição da pressão de compactação utilizada.

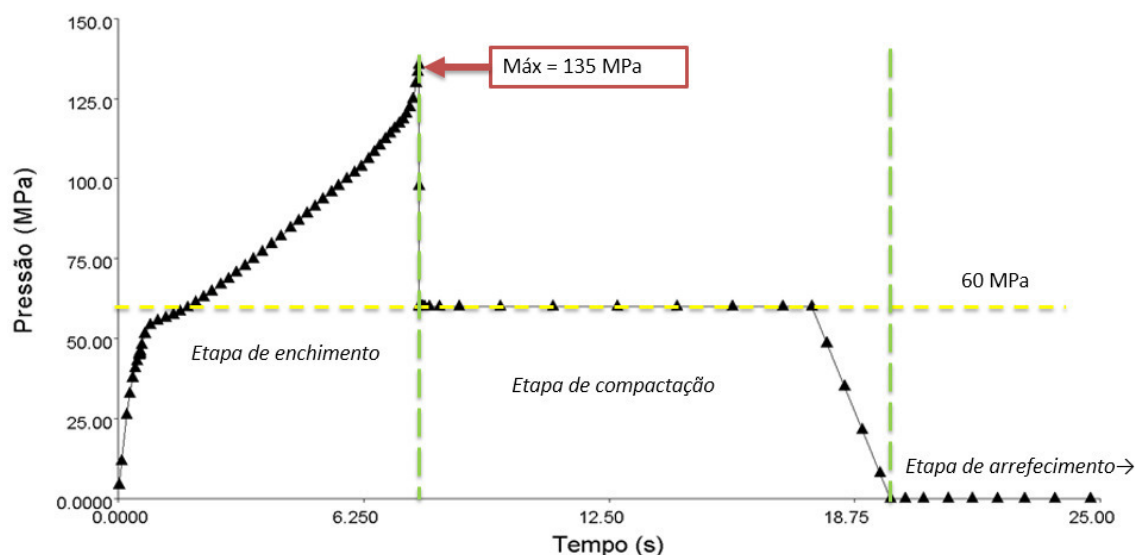


Figura 54 - Evolução prevista pela simulação numérica da pressão no bico de injeção, considerando a proposta de alteração 1.

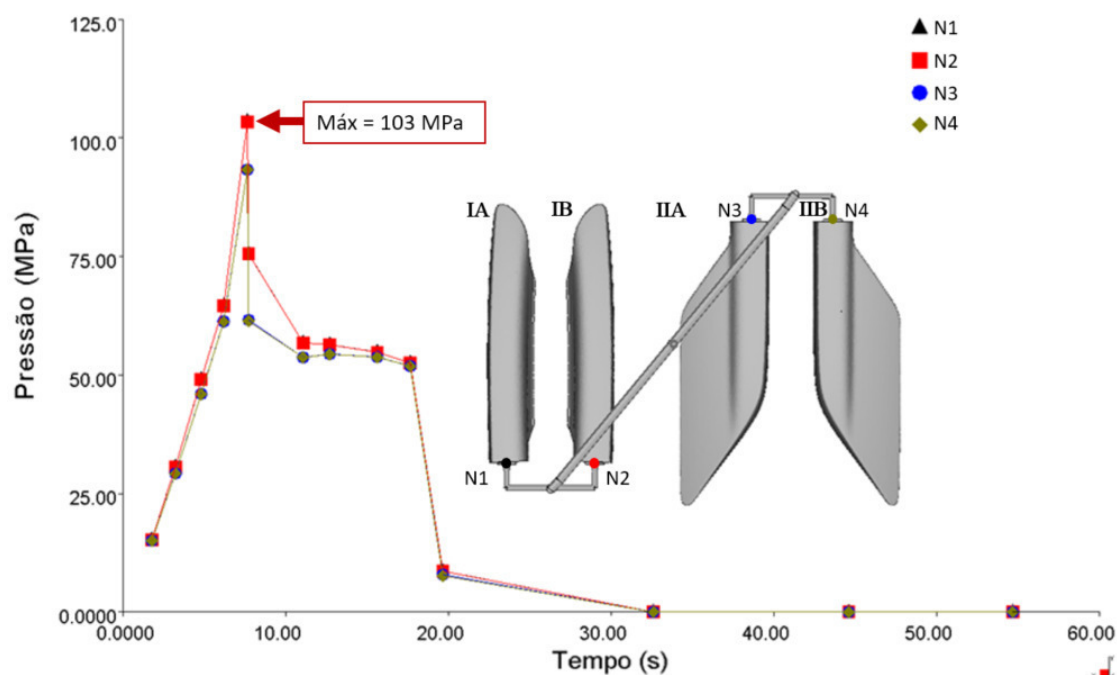


Figura 55 - Evolução prevista pela simulação numérica da pressão nas zonas dos ataques (cuja localização é identificada na figura) de cada peça, considerando a proposta de alteração 1.

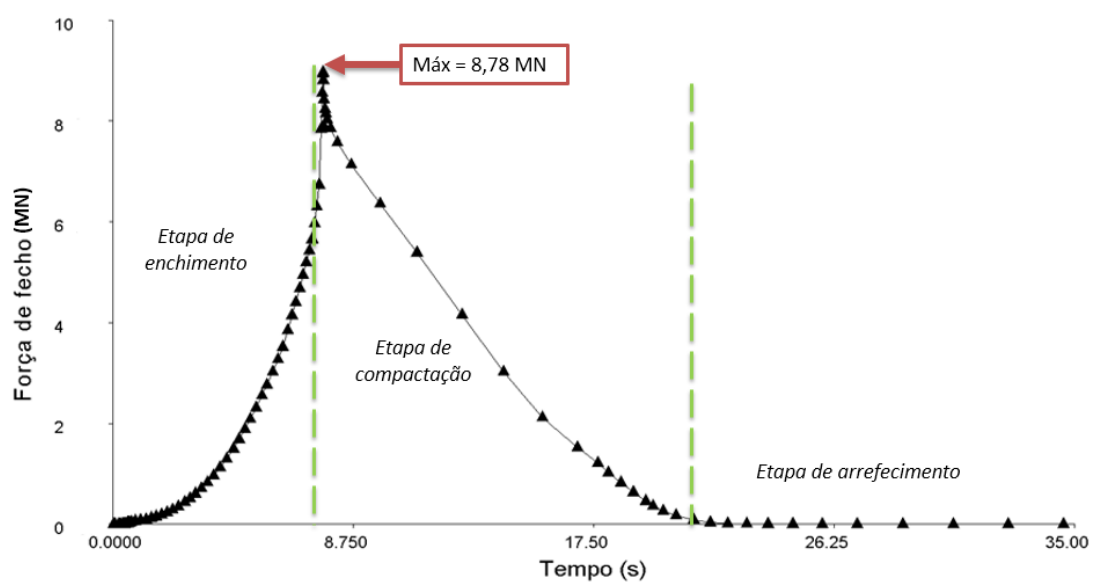


Figura 56 - Evolução prevista pela simulação numérica da força de fecho do molde, considerando a proposta de alteração 1.

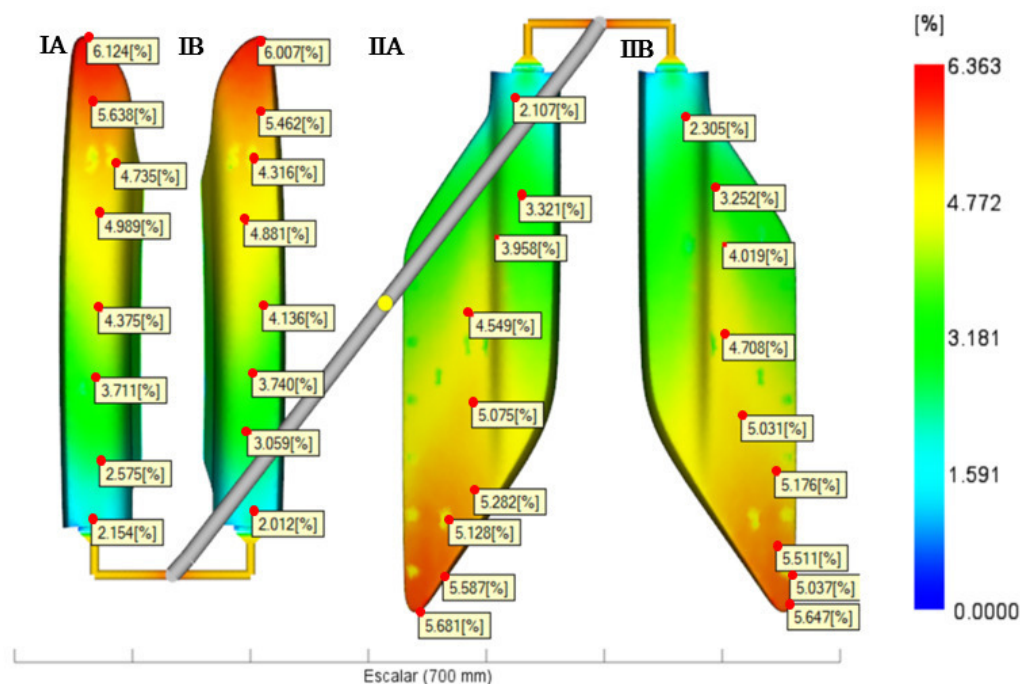


Figura 57 - Valores previstos pela simulação numérica para a contração volúmica média (ao longo da espessura) em diferentes pontos das peças, considerando a proposta de alteração 1.

3.3 PROPOSTA DE ALTERAÇÃO 2

A análise anterior mostrou que as alterações propostas conduziram a uma evolução contração nas peças contrária à pretendida. Para contrariar este fenómeno, favorecendo um aumento da uniformidade da compactação do polímero no interior das cavidades moldantes das peças, foi adicionado ao modelo 3D do molde um segundo ataque em cada uma das peças maiores, dado que é nestas peças que ocorre o defeito de chupado. Devido à necessidade de minimizar as alterações estéticas nas zonas frontais das peças, os ataques adicionados foram do tipo Bayer e o seu posicionamento foi escolhido de forma que a alimentação do polímero através destes pontos ocorresse na face posterior das peças (Figura 58). Para ligar estes novos ataques, foi adicionada uma nova ramificação do canal quente ligada a um novo canal frio de alimentação aos novos ataques. Foi também adicionado um obturador na zona terminal do novo canal quente com o objetivo de atuar como válvula programável de abertura e fecho. Neste estudo, foi definido que abertura do obturador ocorria após 7,15 s do início da injeção. Este valor foi determinado através de um processo iterativo, de forma a originar a maior compactação possível na extremidade mais

afastadas dos ataques tipo lâmina das peças maiores. Convém referir que, tal como na proposta anterior, estas alterações podem ser implementadas no molde atualmente em serviço.

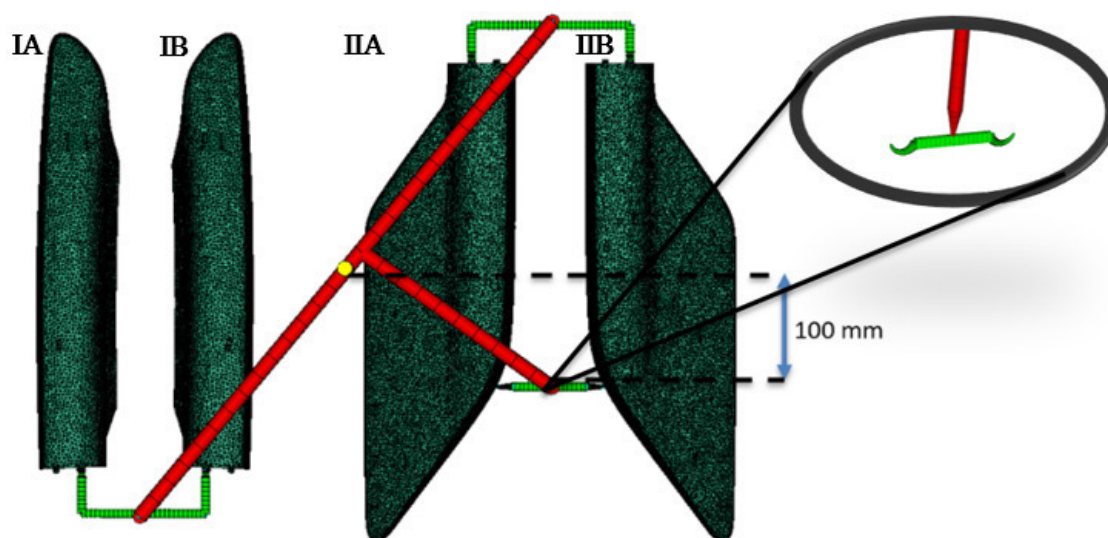

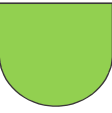
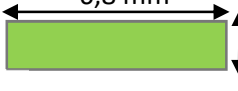

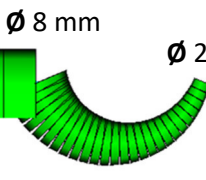


Figura 58 - Sistema de alimentação alternativo proposto. Os canais quentes e frios são representados a vermelho e verde, respetivamente. Na figura também é apresentado uma ampliação da zona do ataque adicionais do tipo Bayer.

Nos novos cálculos efetuados, foram mantidos os ataques originais tipo lâmina. Na Tabela 10 são apresentadas as características principais do novo sistema de alimentação. Tendo em conta o efeito positivo observado na análise anterior da redução da pressão de compactação na força máxima de fecho de molde e, consequentemente, na formação de rebarba nas peças injetadas, decidiu-se manter pressão de compactação igual a 60 MPa.

Tabela 10 - Características do sistema de alimentação considerado na proposta de alteração 2.

Canais quentes	Canais frio	Ataques lamina	Ataques Bayer
 <p>Ø Canal: 12mm</p> <p>Ø Obturador: 5mm</p> <p>Ø Ataque: 4mm</p>	 <p>8 mm</p> <p>8 mm</p>	<p>Ataque peças grandes</p>  <p>6,8 mm</p> <p>3,5 mm</p> <p>Ataque peças pequenas</p>  <p>6,3 mm</p> <p>2,5mm</p>	 <p>Ø 8 mm</p> <p>Ø 2 mm</p>

Na tabela seguinte é apresentada a duração prevista da etapa de enchimento de cada peça. Como se pode verificar, a solução proposta conduz também a diferenças no tempo de enchimento das peças grandes e pequenas, mas agora a duração desta etapa é menor para as peças grandes. Esta alteração é justificada pelo maior caudal de polímero que é fornecido às cavidades das peças grandes na fase final do enchimento (após a abertura do obturador aos 7,15 s) através dos novos ataques. As diferenças na duração da etapa de enchimento são também visíveis na Figura 59, que mostra um maior preenchimento do volume da cavidade das peças grandes do que nas pequenas. Comparativamente ao que acontecia na proposta anterior, as peças pequenas no ponto de comutação não se encontram em sobrepressão, o que representa uma melhor distribuição de caudal ao longo do enchimento das peças.

Em termos da progressão da frente de fluxo (Figura 60), as diferenças relativamente à situação original (Figura 45) são pouco significativas, resumindo-se essencialmente a uma pequena perturbação no fluxo do polímero junto às extremidades mais afastadas dos ataques tipo lâmina das peças grandes, provocada pela abertura do obturador quando a etapa de enchimento está praticamente terminada.

Tabela 11 - Duração prevista pela simulação numérica para a etapa de enchimento de cada peça, considerando a proposta de alteração 2.

Peças	Duração da etapa de enchimento (s)
IA	7,76
IB	7,76
IIA	7,87
IIB	7,87

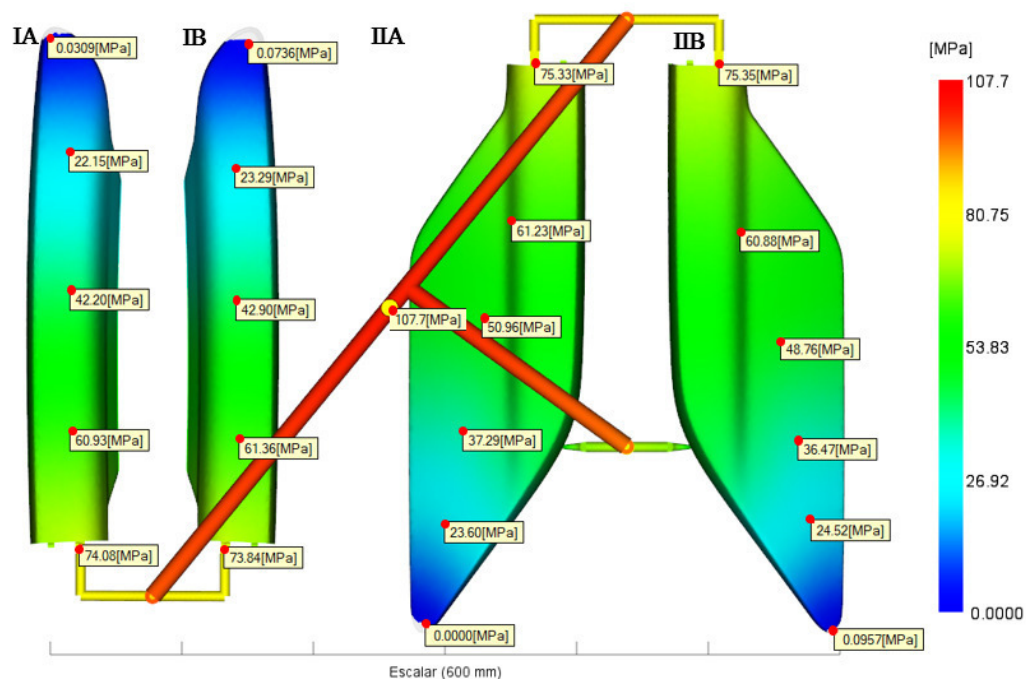


Figura 59 - Valores previstos pela simulação numérica para a pressão em diferentes pontos do interior das cavidades moldantes das peças no fim da etapa de enchimento, considerando a proposta de alteração 2.

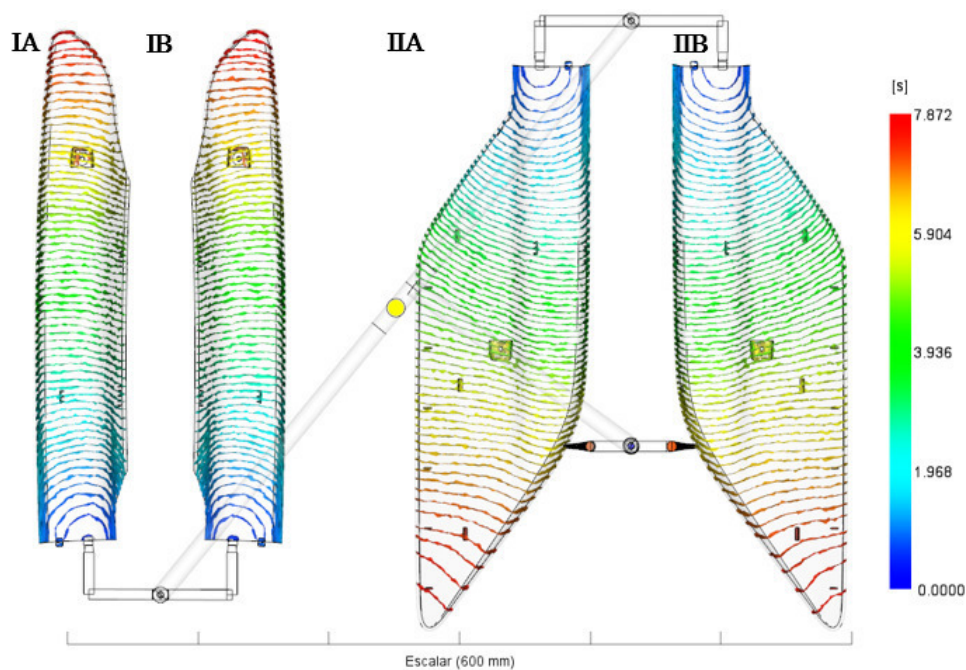


Figura 60 - Evolução prevista pela simulação numérica para a posição da frente de fluxo do polímero durante a etapa de enchimento das cavidades moldantes das peças, considerando a proposta de alteração 2.

Outra alteração originada pelas modificações propostas é a pressão no bico de injeção (Figura 61), cujo valor máximo diminui de 133 MPa para 115 MPa. Após a abertura do obturador que controla o fluxo do polímero dos ataques de tipo Bayer, ocorre uma redução brusca de pressão seguida de um aumento até atingir 107 MPa no ponto de comutação. A diminuição da pressão máxima no bico de injeção é acompanhada por uma diminuição dos valores máximos de pressão nos ataques (Figura 62), que diminui de 101 MPa para 75 MPa, e da força de fecho do molde (Figura 63), que diminui de 8,98 MN para 6,41 MN. Esta última variação é particularmente importante pois indica que a solução proposta deverá conduzir a uma redução significativa do defeito de rebarba nas peças.

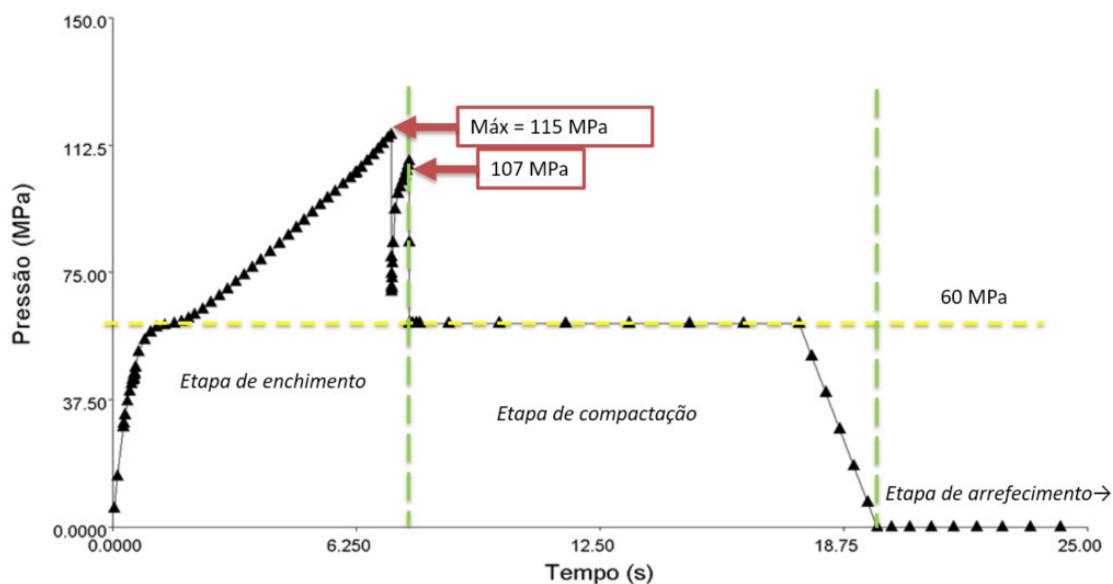


Figura 61 - Evolução prevista pela simulação numérica da pressão no bico de injeção, considerando a proposta de alteração 2.

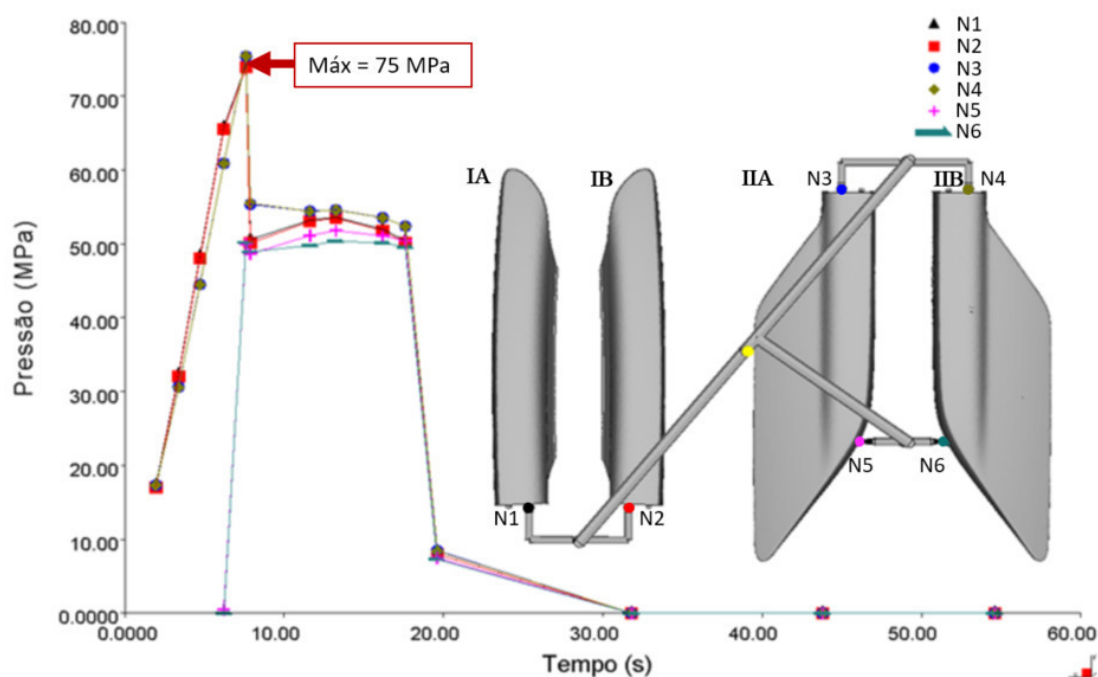


Figura 62 - Evolução prevista pela simulação numérica da pressão nas zonas dos ataques (cuja localização é identificada na figura) de cada peça, considerando a proposta de alteração 2.

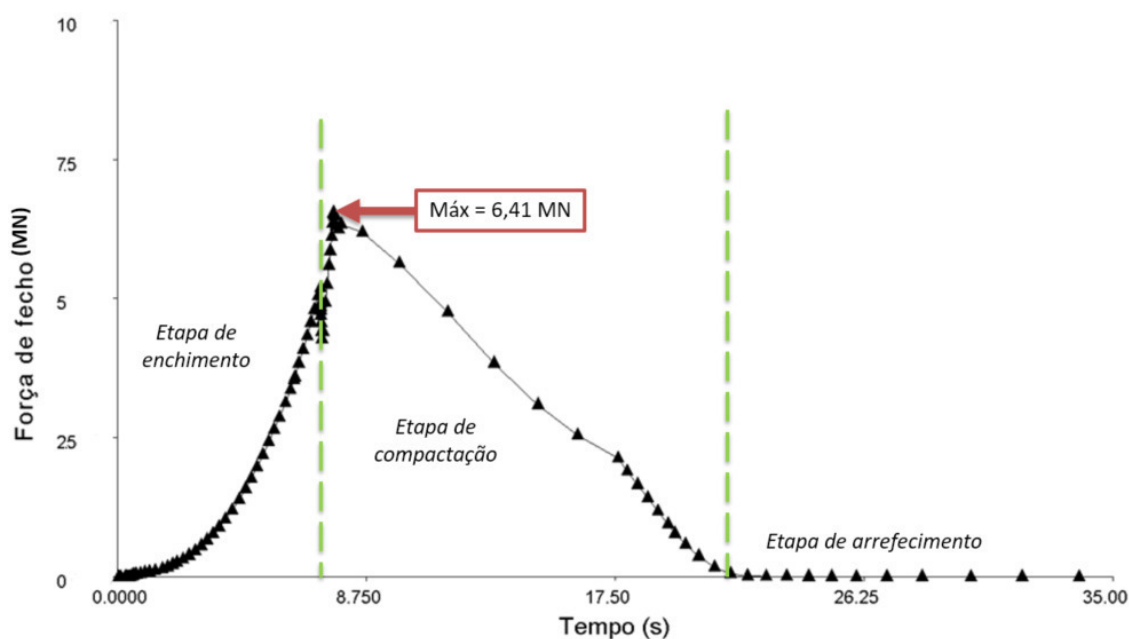


Figura 63 - Evolução prevista pela simulação numérica da força de fecho do molde, considerando a proposta de alteração 2.

Apesar deste último resultado positivo, os cálculos efetuados permitem antever também alguns problemas nas peças produzidas com o molde e condições de injeção propostas. Um destes potenciais problemas é resultante da velocidade de deformação de corte excessiva registada na extremidade dos novos ataques (Figura 63). Com efeito, este valor ultrapassa 60000 s^{-1} e, sendo

superior ao limite recomendado para o polímero utilizado (50000 s^{-1}) poderá originar a degradação do material durante o enchimento das cavidades das peças grandes (Figura 64). Outro problema é o aumento das diferenças nos valores de contração nas peças pequenas (Figura 65), apesar de não se observar uma alteração significativa deste parâmetro nas peças grandes.

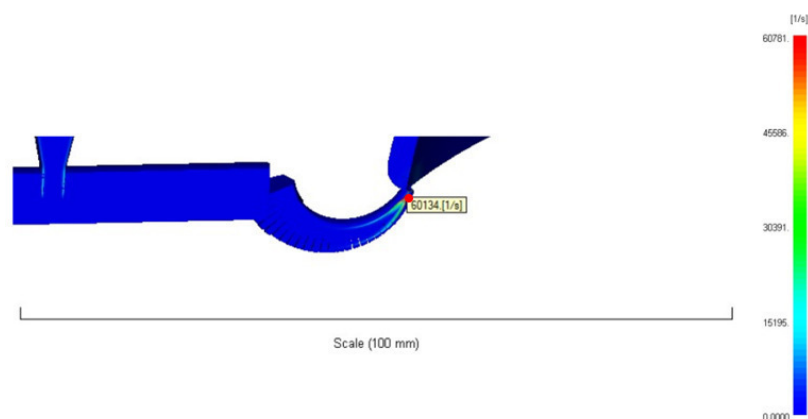


Figura 64 – Velocidade de deformação de corte na zona dos ataques tipo Bayer prevista pela simulação numérica para a proposta 2.

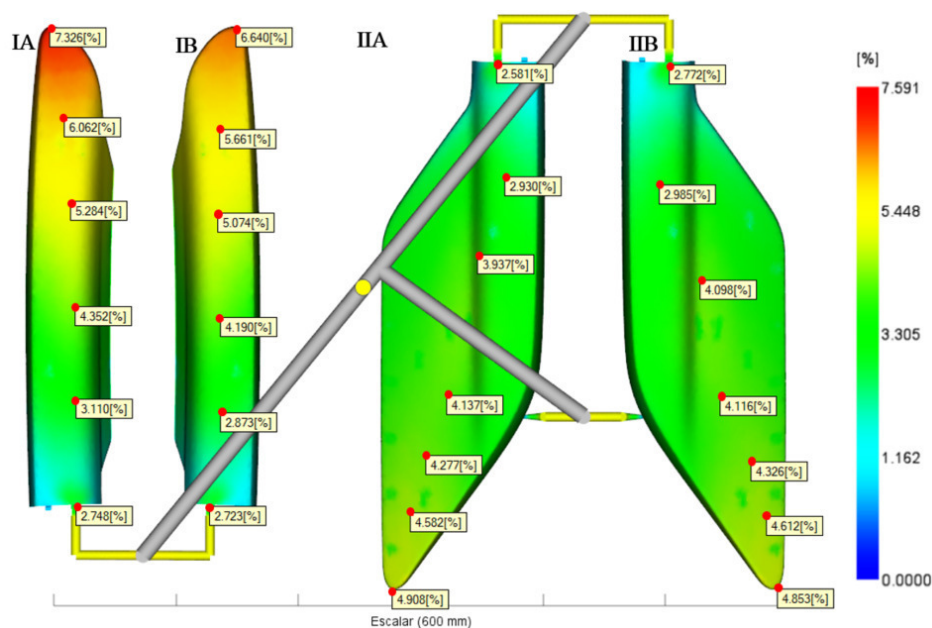


Figura 65 - Valores previstos pela simulação numérica para a contração volúmica média (ao longo da espessura) em diferentes pontos das peças, considerando a proposta de alteração 2.

3.4 PROPOSTA DE ALTERAÇÃO 3

Apesar da diminuição da força máxima de fecho do molde e uma compactação mais uniforme das peças maiores que favorecem, respetivamente uma diminuição do defeito de rebarba em todas as peças e do defeito de chupado nas peças grandes. A solução proposta na secção anterior também origina um aumento do gradiente de compactação nas peças pequenas e velocidades de deformação de corte excessiva na zona dos novos ataques.

Uma solução possível para o aumento dos gradientes de compactação é a adição de ataques também às cavidades das peças pequenas. No entanto, a necessidade destes ataques serem posicionados em zonas não visíveis das peças e a utilização de apenas um ataque adicional, obriga à troca das posições relativas das cavidades moldantes das peças pequenas (Figura 66). De referir que esta alteração das cavidades moldantes implica que a implementação desta proposta exige a produção de um novo molde e, consequentemente, um investimento mais avultado.

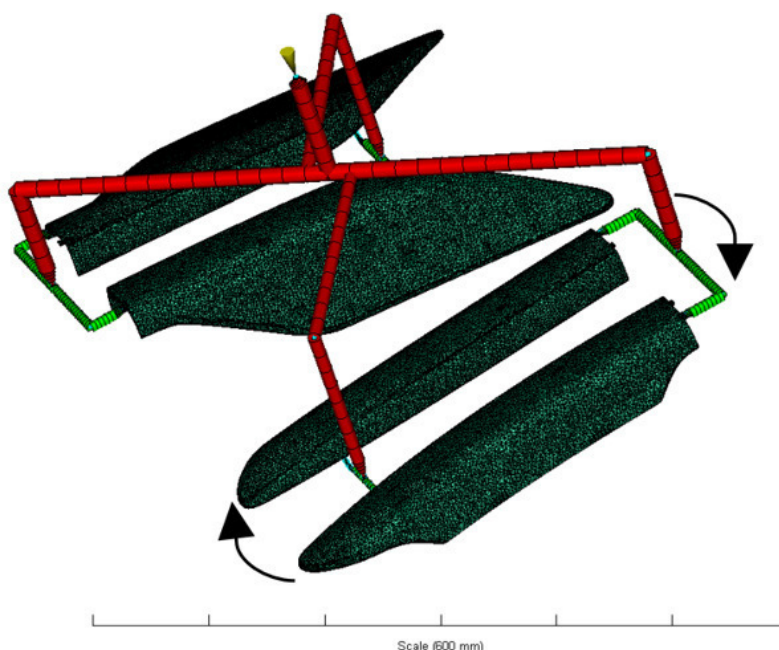


Figura 66 – Alteração do posicionamento das cavidades moldantes das peças pequenas e novo sistema de alimentação.

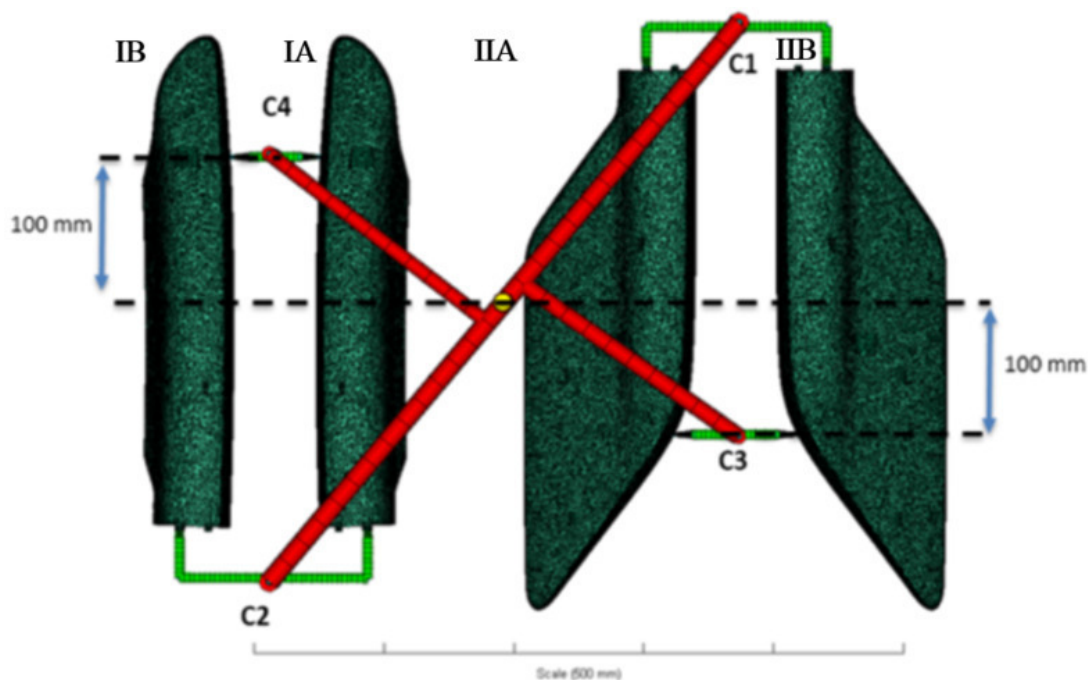

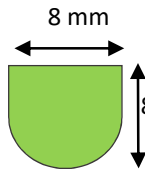
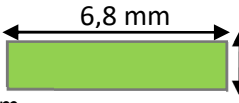
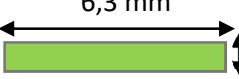
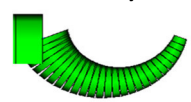


Figura 67 - Configuração proposta das cavidades moldantes das peças e sistema de alimentação. Os canais quentes e frios são representados a vermelho e verde, respetivamente.

Assim, a solução que agora se propõe difere da solução anterior no posicionamento relativo das cavidades moldantes das peças pequenas, na alteração do sistema de alimentação das peças menores (de forma a incluir ataques adicionais do tipo Bayer), nas dimensões dos canais quentes de alimentação aos ataques do tipo lâmina (identificados na Figura 67 como canais C1 e C2) e no ponto de comutação (que agora corresponde a 99% do volume total das cavidades do molde). O novo sistema de alimentação (cujas características dimensionais são apresentadas na Tabela 12) inclui um obturador no fim do canal quente C4 e um aumento do diâmetro dos canais quentes C1 e C2 de 12 mm para 16 mm, com o objetivo de favorecer o enchimento das cavidades moldantes das peças através dos ataques tipo lâmina. O novo obturador foi programado para abrir após a etapa de enchimento (ponto de comutação), enquanto que o obturador posicionado no fim do canal C3 continuou a abrir após 7,15 s do início da injeção. A pressão de compactação utilizada nas propostas anteriores (60 MPa) foi mantida.

Tabela 12 - Características do sistema de alimentação, considerado na proposta de alteração 3. C1, C2, C3 e C4 representam os canais quentes identificados na Figura 67.

Canais quentes	Canais frios	Ataques lâmina	Ataques Bayer
 <p>C1=C2 \varnothing Canal: 16mm \varnothing Obturador: 6mm \varnothing Ataque: 5mm</p> <p>C3=C4 \varnothing Canal: 12mm \varnothing Obturador: 5mm \varnothing Ataque: 4mm</p>	 <p>8 mm</p> <p>8 mm</p>	<p>Ataque peças grandes</p>  <p>6,8 mm</p> <p>3,5 mm</p> <p>Ataque peça pequena</p>  <p>6,3 mm</p> <p>2,5mm</p>	 <p>\varnothing 8 mm \varnothing 2 mm</p>

Dado que a alimentação da cavidade das peças menores através dos novos ataques tipo Bayer ocorrem apenas na etapa de compactação, as diferenças no processo de injeção durante a etapa de enchimento relativamente à proposta anterior serão devidas ao aumento do diâmetro dos canais quentes C1 e C2 e à antecipação do ponto de comutação.

Não se observou grande alteração significativa dos tempos de enchimento das peças (Tabela 13). O enchimento mais rápido da cavidade destas peças é confirmado pelos resultados nas Figura 68 e 69, onde se pode verificar no ponto de comutação existe um enchimento praticamente completo das cavidades das peças pequenas e que a maioria do volume não preenchido se localiza nas cavidades das peças grandes. Estas diferenças são também testemunhadas pela maior desaceleração da frente de fluxo registada na fase final de enchimento das peças grandes.

Tabela 13 – Duração prevista pela simulação numérica para a etapa de enchimento de cada peça, considerando a proposta de alteração 3.

Peças	Duração da etapa de enchimento (s)
IA	7,63
IB	7,63
IIA	7,74
IIB	7,74

As alterações efetuadas no sistema de canais quentes e no ponto de comutação está também na origem na diminuição dos valores máximos de pressão no bico de injeção (Figura 70), que passou de 115 MPa para 107 MPa, e as zonas dos ataques tipo lâmina (Figura 71), que passou de 75 MPa para 64 MPa. Estas reduções de pressão refletem-se também numa diminuição da força máxima de fecho do molde (Figura 72), que passa de 6,41 MN para 6,17 MN.

Outro resultado positivo é a diminuição acentuada da velocidade de corte máxima (Figura 73), que passou de valores superiores a 60000 s^{-1} para pouco mais do que 35000 s^{-1} (valor bastante inferior ao limite de 50000 s^{-1} indicado para o polímero). Este valor máximo foi registado na zona dos ataques tipo Bayer das peças grandes e a sua diminuição é o resultado de uma distribuição do caudal no sistema de alimentação que favorece o enchimento das cavidades moldantes das peças através dos ataques tipo lâmina.

No que diz respeito à contração das peças (Figura 74), os cálculos efetuados mostram uma redução relativamente acentuada dos valores nas peças pequenas. No caso das peças grandes, a variação dos valores absolutos de contração e do gradiente ao longo da peça relativamente aos obtidos para a proposta anterior é menos acentuada.

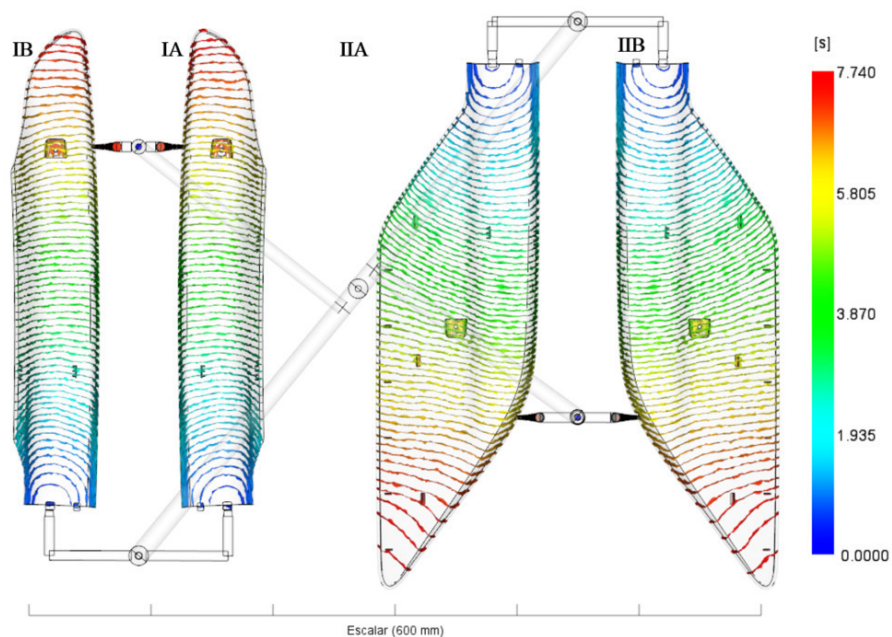


Figura 68 - Evolução prevista pela simulação numérica para a posição da frente de fluxo do polímero durante a etapa de enchimento das cavidades moldantes das peças, considerando a proposta de alteração 3.

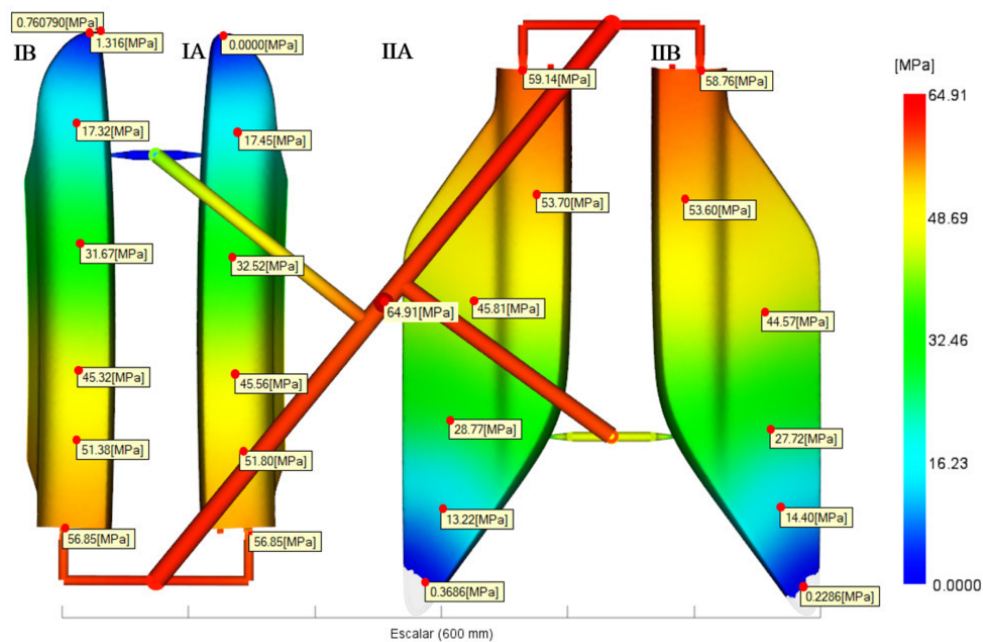


Figura 69 - Valores previstos pela simulação numérica para a pressão em diferentes pontos do interior das cavidades moldantes das peças no fim da etapa de enchimento, considerando a proposta de alteração 3.

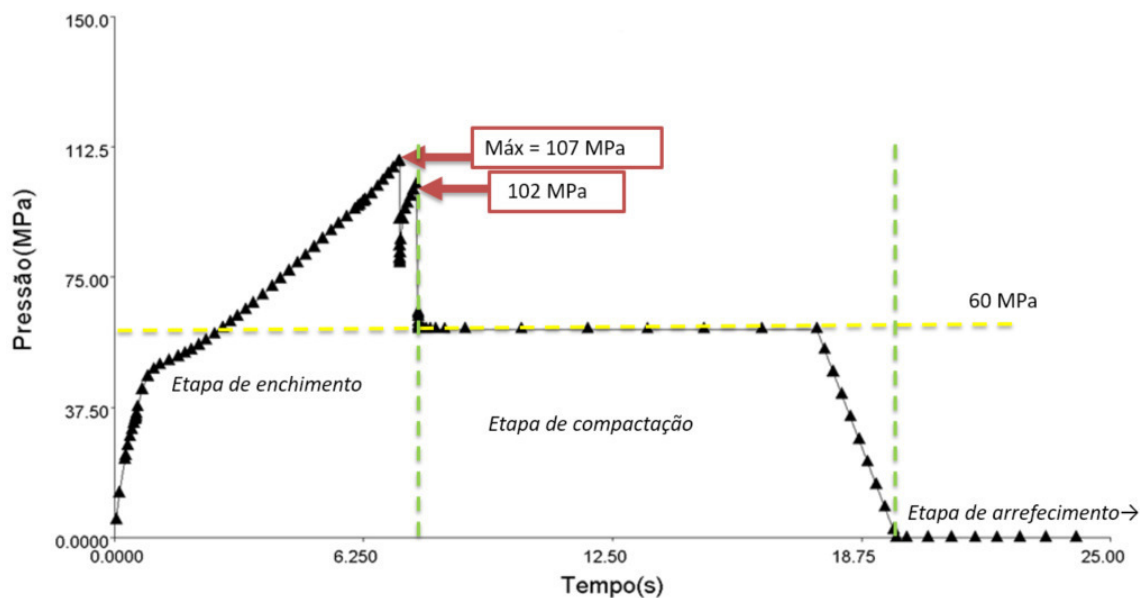


Figura 70 - Evolução prevista pela simulação numérica da pressão no bico de injeção, considerando a proposta de alteração 3.

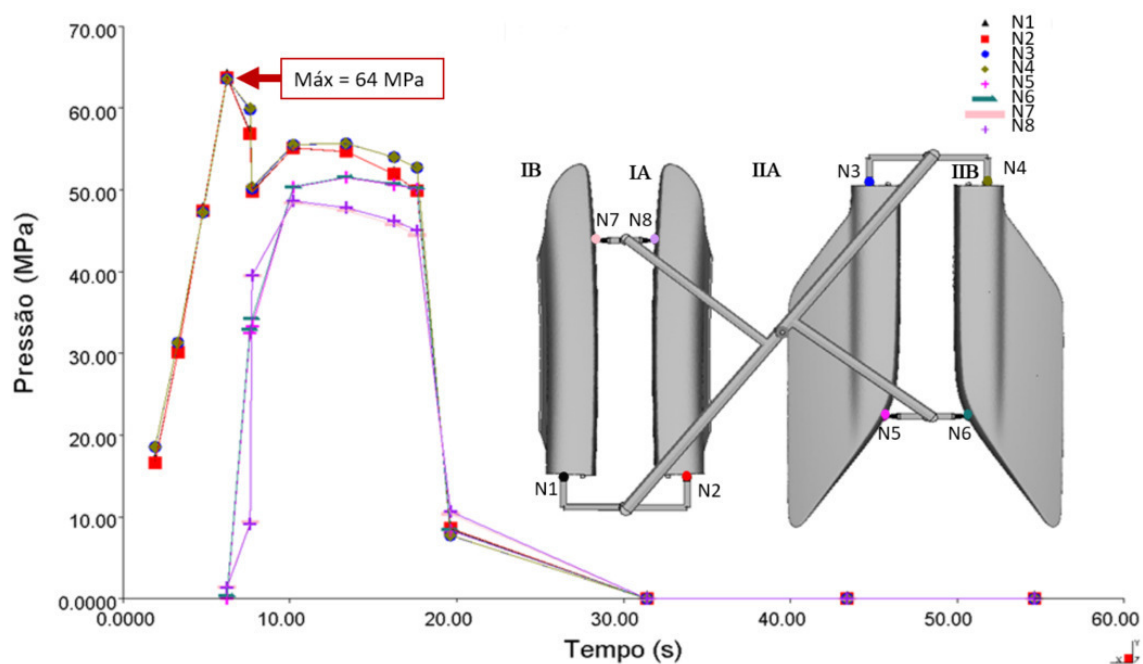


Figura 71 - Evolução prevista pela simulação numérica da pressão nas zonas dos ataques (cuja localização é identificada na figura) de cada peça, considerando a proposta de alteração 2.

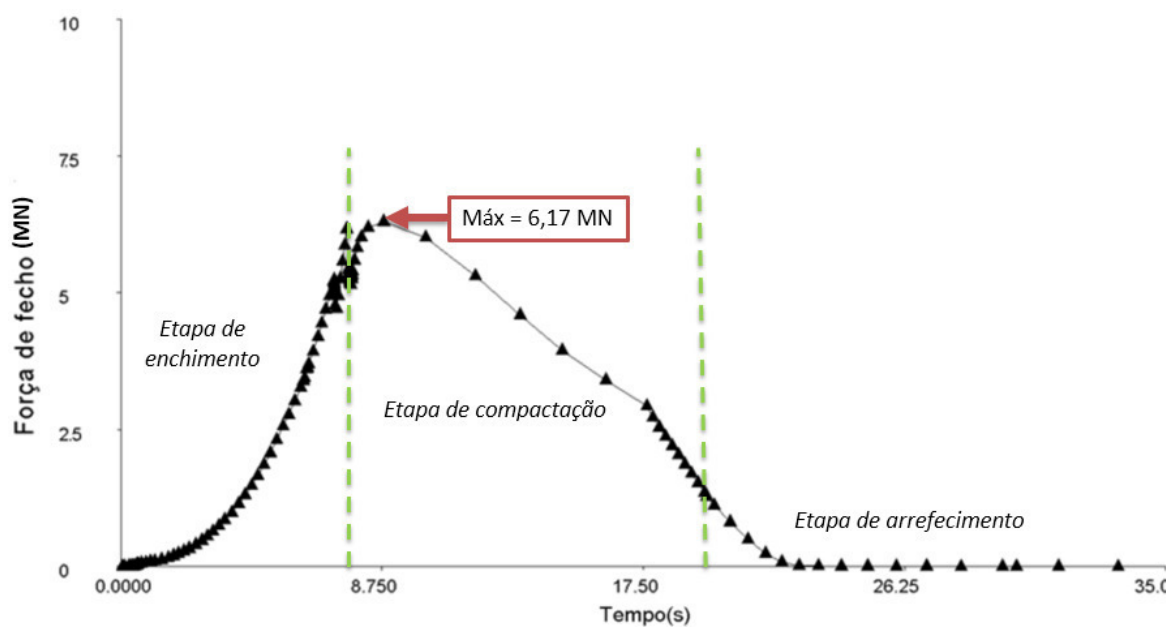


Figura 72 - Evolução prevista pela simulação numérica da força de fecho do molde, considerando a proposta de alteração 3.

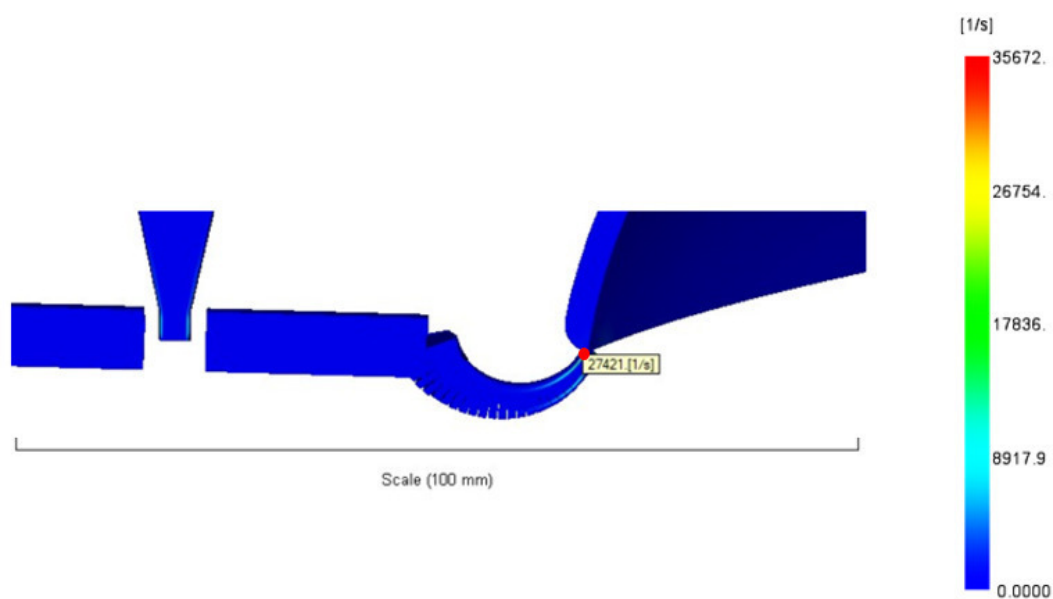


Figura 73 - Velocidade de deformação de corte na zona dos ataques tipo Bayer prevista pela simulação numérica para a proposta 3.

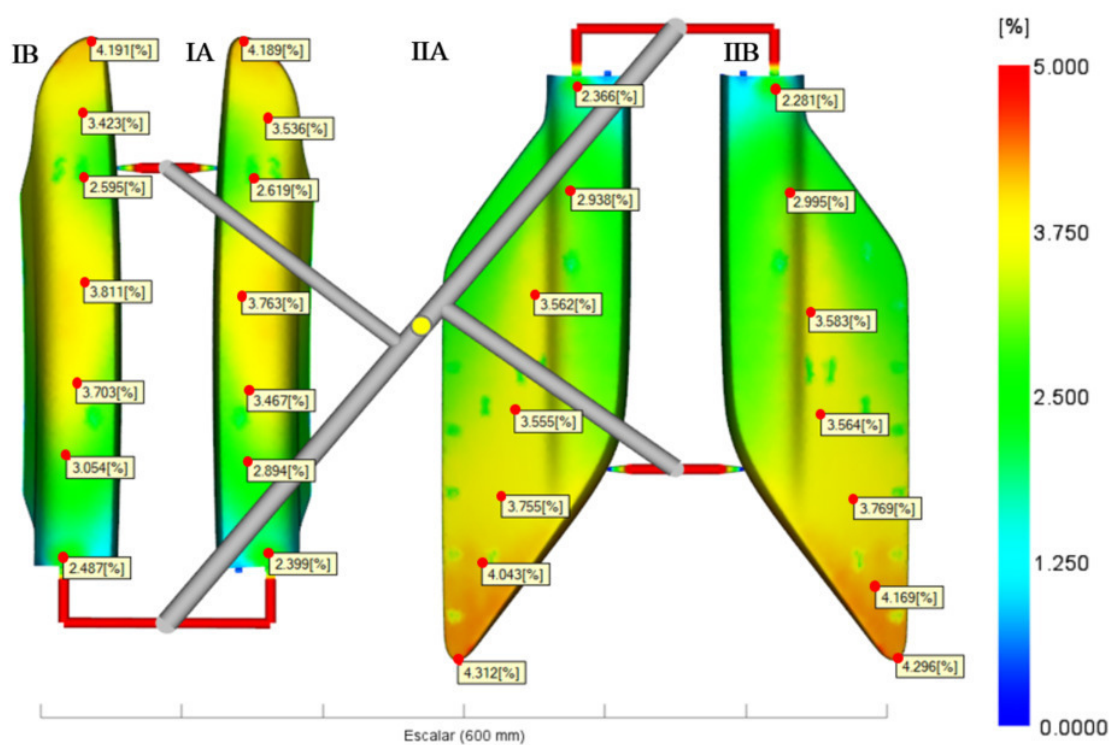


Figura 74 - Valores previstos pela simulação numérica de contração volúmica média (ao longo da espessura) em diferentes pontos das peças, considerando a proposta de alteração 3.

Por comparação com a situação inicial (molde e condições de injeção atualmente utilizados na produção das peças), esta solução permite uma diminuição significativa da pressão máxima no bico de injeção (que passa de 133 MPa para 107 MPa) e da força de fecho do molde (que passa de 8,97 MN para 6,17 MN). Estas variações permitem a utilização de pressões de injeção mais reduzidas e diminuir as distorções das cavidades moldantes e o desgaste do molde associados a elevadas forças de fecho, ao mesmo tempo que reduz a tendência para a formação de rebarba nas peças. A proposta atual permite ainda uma compactação mais uniforme das peças pequenas, que se traduz em menores diferenças de contração. Porém, os valores de contração ao longo das peças grandes são semelhantes aos obtidos para o molde e condições de injeção atualmente utilizados. Isto indica que as alterações propostas não deverão promover uma diminuição significativa do defeito de chupado observado nestas peças. No entanto, o aumento da uniformidade de compactação das peças, de forma a garantir a evitar estes defeitos, deverá poder ser conseguida através de um aumento da secção dos novos ataques (devendo ser considerada a substituição por ataques com outra geometria), através da alteração da posição destes novos ataques para uma zona mais próxima da extremidade das peças (onde a compactação do polímero é menor) ou mesmo através da produção de cada tipo de peças em moldes individuais. Embora, durante o período do estágio, não tenha sido possível realizar as simulações numéricas que permitissem confirmar estas hipóteses, estes estudos deverão ser realizados no futuro próximo, especialmente se a proposta de alteração construída com base no presente trabalho e apresentada ao cliente for aceite.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho, realizado no âmbito de um estágio curricular na empresa Prinemo, teve como principal objetivo analisar, utilizando o método dos elementos finitos (MEF), o processo de moldagem por injeção de peças em ABS destinadas à indústria automóvel, de forma a compreender a origem dos defeitos de rebarba e de chupado exibidos pelas peças e propor soluções que permitissem diminuir a tendência destes defeitos ocorrerem.

O estudo envolveu numa primeira etapa a análise por MEF do processo de injeção atualmente utilizadas na produção das peças que permitiu verificar a necessidade de ser utilizada uma força de fecho do molde muito elevada devido à acentuada pressão interna do polímero no interior das cavidades do molde que favorece a formação de rebarba. As simulações numéricas permitiram também verificar o desenvolvimento de um gradiente de contração nas peças relativamente elevado devido a uma compactação heterogénea do material, que favorece a formação do defeito de chupado.

Neste contexto, foram propostos três conjuntos de alterações ao molde e às condições de injeção atuais, nomeadamente:

- Na proposta 1 foi aumentada a área secção reta dos ataques e reduzida a pressão na etapa de compactação;
- Na proposta 2 foi adicionado ataques às cavidades das peças maiores e reduzida a pressão de compactação;
- Na proposta 3 foi adicionado ataques às cavidades de todas as peças, aumentado o diâmetro dos canais quentes de alimentação aos ataques originais e antecipado o ponto de comutação.

A tabela seguinte, que reúne os resultados principais obtidos nos cálculos efetuados para cada proposta, permite verificar que a proposta 3 é a que conduz a um menor valor de força de fecho do molde e, conseqüentemente, a uma menor tendência para o desenvolvimento de rebarba nas peças. Adicionalmente, esta solução exige a menor pressão de injeção e conduz a uma diminuição das diferenças de contração nas peças mais pequenas. No entanto, não conduz a uma alteração significativa do gradiente de contração desenvolvido nas peças grandes e exige a produção de um novo molde de injeção.

Tabela 14 - Resumo dos resultados principais obtidos no estudo.

Situação do molde	Processo atual	Proposta 1	Proposta 2	Proposta 3
<i>Tempo de enchimento das peças pequenas (s)</i>	7,55	7,54	7,76	7,63
<i>Tempo de enchimento das peças grandes (s)</i>	7,70	7,73	7,87	7,74
<i>Pressão de compactação (MPa)</i>	85	60	60	60
<i>Pressão máx. de injeção (MPa)</i>	133	135	115	107
<i>Pressão máx. nos ataques (MPa)</i>	101	103	75	64
<i>Força de fecho máxima (MN)</i>	8,97	8,78	6,41	6,17
<i>Velocidade de deformação de corte máxima (s⁻¹)</i>	29513	27436	60781	35672
<i>Diferenças de contração das peças pequenas</i>	--	Maior	Quase igual	Menor
<i>Diferenças de contração das peças grandes</i>	--	Maior	Maior	Quase igual
<i>Reutilização do molde atual?</i>	---	Sim	Sim	Não

6 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalho futuro propôs-se um estudo onde sejam analisadas modificações ao molde e das condições de injeção atuais que possam diminuir o gradiente de contração nas peças, em particular nas peças grandes. Tendo como base a proposta 3, sugere-se o aumento da seção dos novos ataques e a alteração da posição destes para uma zona mais próxima da extremidade das peças (onde a compactação do polímero é menor). Também deverá ser considerada a hipótese de produção de moldes independentes para de cada tipo de peças.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] – Callister, W., & Rethwisch, D., *Materials science and engineering: an introduction. Materials Science and Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 7ª edition (2007).
- [2] – Sebastião, V. V. *Ciência dos polímeros*, Artliver, 2ª edição (2006).
- [3] – F.Smith, W., *Princípios de ciência e engenharia dos materiais*, McGRAW-HILL, 3º edição (2006).
- [4] – Jay Shoemaker, *Moldflow Design Guide, A Resource for Plastics Engineers* Moldflow Corporation, 1ª Edition (2006).
- [5] – Rees, H., & Catoen, B. *Selecting Injection Molds. Selecting Injection Molds*, HANSER (2006).
- [6] – Davim, P. *Tecnologia dos materiais plásticos*, Universidade aberta (1998).
- [7] – Centimfe, *Manual do projectista para moldes de injeção de plástico*. Centro Tecnológico da Indústria de Moldes Ferramentas Especiais e Plástico (2003).
- [8] – Bryce, D., *Plastic Injection Molding, ...mold design and construction fundamentals, Volume III: Fundamentals of Injection Molding series*, Society of Manufacturing Engineers (1998).
- [9]– Campo, E.A., *The Complete Part Design Handbook, For Injection Molding of Thermoplastics*, HANSER (2006).
- [10] – Kazmer, D. O., *Injection Mold Design Engineering*, HANSER, 2ª Edition (2016).
- [11] – Strizke, B., *Custom Molding of Thermoset Elastomers*, HANSE (2009).
- [12] – Rees H. e Catoen B., *Selecting Injection Molds, Weighing Cost vs Productivity*, Hanser (2006).
- [13] - Software Autodesk Moldflow Insight (2010).
- [14] – Zhou, H., *Computer Modeling for Injection Moldfing, Simulation, Optimization, and Control*, Wiley (2013).
- [15] – Machado, A.V., Cramez, M.C. e Cunha, A.M., *Manual técnico, Conceitos Gerais sobre Materiais Plásticos*, CASO (junho de 2001).
- [16] – Campilho, R.D.S.G., *Métodos de elementos finitos: ferramenta de análise estrutural*, Pubindústria (2012).
- [17] – Dias, F.T., Cruz, J.P., Valente, R.A. e Sousa, R.J.A, *Método dos elementos finitos, técnicas de simulação numérica em engenharia*, Lidel (2010).
- [18] – <http://www.prifer.pt/web1/zp/tpl1/id1/index.asp> (acedido em 26/04/2017)
- [19] – <http://www.prinemo.com/index.php/en/> (acedido em 26/04/2017))
- [20] – <http://www.promaplast.com/uploads/Terluran%20HH-112.pdf> (acedido em 13/11/2017))

8 ANEXOS

Tabela A1 - Registo dos detalhados da malha 2D ("dual domain") utilizada no trabalho.
Detalhes do modelo :

Tipo de malha	=	Dual Domain
Percentagem de correspondência da malha	=	92.5 %
Percentagem de correspondência recíproca de malha	=	90.8 %
Número total de nós	=	52443
Número total de nós de ponto de injeção	=	1
As etiquetas de nó de ponto de injeção são:		
	261906	
Número total de elementos	=	104718
Número de elementos da peça	=	104528
Número de elementos do gito/fuso/ataque	=	190
Número de elementos do canal	=	0
Número de elementos de ligação	=	0
Plano de partição normal	(dx) =	0.0000
	(dy) =	0.0000
	(dz) =	1.0000
Razão de aspeto média de elementos de triângulo	=	2.4935
Razão de aspeto máxima de elementos de triângulo	=	19.9983
Número de elementos com razão de aspeto máxima	=	4517587
Razão de aspeto mínima de elementos de triângulo	=	1.1552
Número de elementos com razão de aspeto mínima	=	4471671
Volume total	=	767.1248 cm ³
Volume cheio inicialmente	=	125.9072 cm ³
Volume a ser cheio	=	641.2177 cm ³
Volume de peça a ser cheio	=	619.7839 cm ³
Volume de gito/canal de alimentação/ataque a ser cheio	=	21.4337 cm ³
Área total projectada	=	1379.1372 cm ²

Tabela A2 - Registo dos detalhados da malha 3D utilizada no trabalho.

Detalhes do Modelo:
=====

Tipo de Malha	=	3D Tetraédrica
Laminados ao longo do raio dos elementos da barra	=	12
Número total de nós da peça	=	198213
Número de nós de tetraedro	=	198022
Número de nós de barra	=	187
Número de nós de ligação barra-tetraedro	=	4
Número total de nós de ponto de injeção	=	1
Os números de nó de ponto de injeção são:		
	261906	
Número total de elementos	=	1041278
Número de elementos da peça	=	1041278
Número de elementos tetraédricos	=	1041088
Número de elementos do gito/fuso/ataque	=	190
Número de elementos quentes do gito/canal de alimentação/ataque	=	70
Volume total	=	767.1364 cm ³
Volume de elementos tetraédricos	=	619.7837 cm ³
Volume de elementos do gito/canal de alimentação/ataque	=	147.3527 cm ³
Volume de elementos quentes do gito/canal de alimentação/ataque	=	125.9185 cm ³
Volume cheio inicialmente	=	125.9185 cm ³
Volume a ser cheio	=	641.2179 cm ³
Volume de peça a ser cheio	=	619.7837 cm ³
Volume de gito/canal de alimentação/ataque a ser cheio	=	21.4342 cm ³
Plano de partição normal	(dx) =	0.0000
	(dy) =	0.0000
	(dz) =	1.0000
Área total projectada	=	1377.0074 cm ²

Thermoplastics material

Mechanical Properties	Shrinkage Properties	Filler Properties	Optical Properties	Environmental Impact
Description	Recommended Processing	Rheological Properties	Thermal Properties	PVT Properties
Mold surface temperature	45	C		
Melt temperature	250	C		
Mold temperature range (recommended)				
Minimum	30	C		
Maximum	60	C		
Melt temperature range (recommended)				
Minimum	230	C		
Maximum	270	C		
Absolute maximum melt temperature	310	C		
Ejection temperature	105	C		
View test information for ejection temperature...				
Maximum shear stress	0.3	MPa		
Maximum shear rate	50000	1/s		

Name: Terluran HH-112 : BASF

OK Ajuda

Figura A1 - Parâmetros de processamento recomendados para o ABS Terluran HH-112.

Process Settings Wizard - Fill+Pack Settings

Mold surface temperature	50	C
Melt temperature	250	C
Filling control		
Injection time	7	s [0:]
Velocity/pressure switch-over		
By %volume filled	99.5	% [0:100]
Pack/holding control		
Packing pressure vs time	Edit profile...	
Cooling time		
Specified	35	s [0:]
Advanced options...		
<input type="checkbox"/> Fiber orientation analysis if fiber material <input type="checkbox"/> Birefringence analysis if material data includes optical properties		

OK Cancelar Ajuda

Figura A2 - Parâmetros gerais de injeção utilizados nas simulações efetuadas.

Tabela A3 – Resultados para a etapa de enchimento obtidos na simulação do processo de injeção atualmente utilizado para a produção das peças estudadas.

Fase de enchimento: Estado: U = Controlo de velocidade
 U/P = Comutação velocidade/pressão
 P = Controlo de pressão

Tempo (s)	Vol ench. (%)	Pr. de inj. (MPa)	F de fecho (tonelada)	Caudal (cm ³ /s)	Congel. Vol (%)	Estado
0.045	0.108	5.740E+00	2.23E-04	6.027	0.00	U
0.125	0.122	1.558E+01	1.46E-03	9.423	0.00	U
0.278	0.432	3.031E+01	2.13E-02	24.772	0.00	U
0.298	1.006	3.212E+01	1.13E-01	40.157	0.00	U
0.365	1.491	3.664E+01	2.53E-01	50.074	0.00	U
0.413	2.018	3.933E+01	5.09E-01	59.995	0.00	U
0.468	2.594	4.191E+01	8.93E-01	65.790	0.00	U
0.513	3.100	4.360E+01	1.29E+00	70.891	0.00	U
0.521	3.194	4.393E+01	1.78E+00	72.786	0.00	U
0.522	3.197	4.397E+01	1.83E+00	72.230	0.00	U
0.523	3.239	4.404E+01	1.86E+00	72.537	0.00	U
0.530	3.312	4.431E+01	2.25E+00	72.106	0.00	U
0.542	3.431	4.500E+01	2.99E+00	68.017	0.00	U
0.550	3.483	4.548E+01	3.11E+00	63.309	0.10	U
0.574	3.704	4.720E+01	3.92E+00	60.538	0.04	U
0.658	4.468	5.200E+01	5.06E+00	62.155	0.02	U
0.807	6.073	5.543E+01	6.05E+00	73.476	0.23	U
0.939	8.154	5.741E+01	7.44E+00	83.351	0.97	U
1.106	10.467	5.886E+01	9.22E+00	86.598	2.14	U
1.314	13.450	5.955E+01	1.12E+01	89.124	3.29	U
1.563	17.097	6.000E+01	1.44E+01	90.579	4.34	U
1.740	19.630	6.058E+01	1.79E+01	90.631	4.88	U
1.928	22.286	6.153E+01	2.19E+01	90.058	5.36	U
2.099	24.668	6.277E+01	2.63E+01	89.398	5.72	U
2.321	27.750	6.455E+01	3.22E+01	88.954	6.13	U
2.530	30.631	6.641E+01	3.92E+01	88.771	6.50	U
2.726	33.322	6.826E+01	4.69E+01	88.668	6.81	U
2.942	36.295	7.034E+01	5.62E+01	88.681	7.10	U
3.144	39.055	7.230E+01	6.58E+01	88.767	7.37	U
3.346	41.837	7.430E+01	7.64E+01	88.859	7.61	U
3.555	44.713	7.639E+01	8.83E+01	88.949	7.86	U
3.804	48.149	7.890E+01	1.04E+02	89.047	8.19	U
4.037	51.335	8.135E+01	1.20E+02	89.131	8.43	U
4.271	54.539	8.385E+01	1.38E+02	89.215	8.66	U
4.488	57.500	8.617E+01	1.56E+02	89.337	8.88	U
4.676	60.061	8.818E+01	1.74E+02	89.473	9.06	U
4.870	62.726	9.024E+01	1.93E+02	89.602	9.25	U
5.072	65.490	9.242E+01	2.14E+02	89.703	9.45	U
5.301	68.644	9.492E+01	2.39E+02	89.791	9.69	U
5.519	71.623	9.730E+01	2.64E+02	89.904	9.90	U
5.720	74.373	9.942E+01	2.89E+02	90.060	10.09	U
5.920	77.120	1.015E+02	3.14E+02	90.214	10.28	U
6.110	79.706	1.034E+02	3.39E+02	90.348	10.46	U
6.277	81.972	1.054E+02	3.66E+02	90.363	10.61	U
6.452	84.352	1.079E+02	3.98E+02	90.228	10.79	U
6.601	86.343	1.101E+02	4.27E+02	90.196	10.95	U
6.741	88.233	1.120E+02	4.53E+02	90.340	11.10	U
6.862	89.846	1.135E+02	4.78E+02	90.518	11.23	U
6.979	91.431	1.150E+02	5.01E+02	90.602	11.36	U
7.092	92.961	1.167E+02	5.27E+02	90.587	11.49	U
7.197	94.361	1.184E+02	5.51E+02	90.574	11.61	U
7.286	95.477	1.201E+02	5.80E+02	90.550	11.72	U
7.361	96.489	1.215E+02	6.06E+02	90.523	11.79	U
7.439	97.513	1.232E+02	6.37E+02	90.497	11.87	U
7.514	98.445	1.252E+02	6.73E+02	90.404	11.95	U
7.574	98.907	1.284E+02	7.54E+02	89.746	12.04	U
7.612	99.351	1.311E+02	8.13E+02	88.892	12.04	U

Volume especificado cheio sob controlo de velocidade. A comutar para controlo de pressão.

7.638	99.504	1.330E+02	8.53E+02	88.600	12.03	U/P
7.643	99.543	1.090E+02	8.54E+02	13.817	12.01	P
7.648	99.582	8.500E+01	8.48E+02	-104.062	12.01	P
7.668	99.739	8.500E+01	8.18E+02	-84.075	12.07	P
7.705	100.000	8.500E+01	8.54E+02	-20.962	12.23	Cheio

Tabela A4 - Resultados para a etapa de compactação obtidos na simulação do processo de injeção atualmente utilizado para a produção das peças estudadas.

Análise de Compactação

Tempo (s)	Compact. (%)	Pr. de inj. (MPa)	F de fecho (tonelada)	M. da peça (g)	Congel. Vol (%)	Estado
7.772	0.14	8.500E+01	8.69E+02	6.26E+02	12.60	P
7.845	0.30	8.500E+01	8.81E+02	6.27E+02	12.70	P
7.993	0.61	8.500E+01	8.99E+02	6.28E+02	13.12	P
8.358	1.39	8.500E+01	9.15E+02	6.29E+02	14.23	P
9.145	3.07	8.500E+01	9.09E+02	6.31E+02	16.53	P
10.779	6.55	8.500E+01	8.35E+02	6.34E+02	21.51	P
12.421	10.05	8.500E+01	7.32E+02	6.35E+02	26.55	P
14.047	13.51	8.500E+01	6.35E+02	6.36E+02	31.86	P
15.578	16.78	8.500E+01	5.39E+02	6.37E+02	37.54	P
16.928	19.65	8.500E+01	4.58E+02	6.38E+02	43.15	P
17.638	21.16	8.500E+01	4.11E+02	6.38E+02	46.63	P
17.914	21.75	7.327E+01	3.82E+02	6.38E+02	48.15	P
18.227	22.42	5.997E+01	3.53E+02	6.38E+02	49.79	P
18.539	23.08	4.667E+01	3.24E+02	6.38E+02	51.49	P
18.852	23.75	3.337E+01	2.97E+02	6.38E+02	53.25	P
19.165	24.42	2.007E+01	2.70E+02	6.38E+02	55.09	P
19.478	25.09	6.767E+00	2.43E+02	6.38E+02	57.04	P
19.638	25.42	0.000E+00	2.28E+02	6.38E+02	58.17	P
19.934	26.06	0.000E+00	2.08E+02	6.38E+02	60.22	P
20.366	26.98	0.000E+00	1.82E+02	6.38E+02	63.54	P
20.856	28.02	0.000E+00	1.56E+02	6.38E+02	67.82	P
21.428	29.24	0.000E+00	1.29E+02	6.38E+02	73.17	P
21.963	30.38	0.000E+00	1.05E+02	6.38E+02	77.93	P
22.525	31.58	0.000E+00	8.34E+01	6.38E+02	82.21	P
23.181	32.98	0.000E+00	6.13E+01	6.38E+02	86.45	P
23.956	34.63	0.000E+00	4.10E+01	6.38E+02	90.66	P
24.869	36.57	0.000E+00	2.55E+01	6.38E+02	94.99	P
25.861	38.69	0.000E+00	1.70E+01	6.38E+02	98.65	P
27.219	41.58	0.000E+00	8.52E+00	6.38E+02	99.79	P
29.219	45.84	0.000E+00	3.67E+00	6.38E+02	99.95	P
31.053	49.75	0.000E+00	1.04E+00	6.38E+02	99.99	P
33.053	54.01	0.000E+00	1.96E-01	6.38E+02	100.00	P
35.053	58.27	0.000E+00	2.50E-02	6.38E+02	100.00	P
37.053	62.53	0.000E+00	1.19E-02	6.38E+02	100.00	P
39.053	66.79	0.000E+00	5.68E-03	6.38E+02	100.00	P
41.053	71.06	0.000E+00	3.04E-03	6.38E+02	100.00	P
43.053	75.32	0.000E+00	1.70E-03	6.38E+02	100.00	P
45.053	79.58	0.000E+00	9.34E-04	6.38E+02	100.00	P
47.053	83.84	0.000E+00	5.00E-04	6.38E+02	100.00	P
49.053	88.10	0.000E+00	2.49E-04	6.38E+02	100.00	P
51.053	92.36	0.000E+00	9.73E-05	6.38E+02	100.00	P
53.053	96.62	0.000E+00	2.33E-05	6.38E+02	100.00	P
54.638	100.00	0.000E+00	8.80E-06	6.38E+02	100.00	P

Tabela A5 - Resultados para a etapa de enchimento obtidos na simulação do processo de injeção relativo à proposta 1.

Fase de enchimento: Estado: U = Controlo de velocidade
 ===== U/P = Comutação velocidade/pressão
 P = Controlo de pressão

Tempo (s)	Vol ench. (%)	Pr. de inj. (MPa)	F de fecho (tonelada)	Caudal (cm ³ /s)	Congel. Vol (%)	Estado
0.034	0.081	4.322E+00	0.00E+00	5.186	0.00	U
0.094	0.086	1.176E+01	5.43E-04	7.843	0.00	U
0.225	0.222	2.620E+01	3.26E-03	18.599	0.00	U
0.300	0.800	3.277E+01	7.36E-02	35.644	0.00	U
0.379	1.519	3.773E+01	2.90E-01	51.903	0.00	U
0.440	2.236	4.074E+01	6.32E-01	63.328	0.00	U
0.492	2.848	4.291E+01	1.08E+00	69.494	0.00	U
0.538	3.382	4.466E+01	1.73E+00	72.557	0.00	U
0.540	3.399	4.472E+01	1.74E+00	73.913	0.00	U
0.541	3.408	4.475E+01	1.82E+00	74.912	0.00	U
0.542	3.422	4.479E+01	1.90E+00	75.842	0.00	U
0.545	3.458	4.489E+01	2.03E+00	76.217	0.00	U
0.547	3.482	4.499E+01	2.11E+00	75.709	0.00	U
0.550	3.516	4.508E+01	2.24E+00	74.836	0.00	U
0.551	3.518	4.512E+01	2.29E+00	74.351	0.00	U
0.553	3.541	4.518E+01	2.32E+00	73.914	0.00	U
0.554	3.557	4.524E+01	2.44E+00	73.323	0.00	U
0.556	3.580	4.534E+01	2.66E+00	72.442	0.00	U
0.557	3.581	4.538E+01	2.66E+00	71.497	0.00	U
0.560	3.621	4.552E+01	2.68E+00	70.680	0.00	U
0.571	3.737	4.606E+01	3.04E+00	69.339	0.00	U
0.610	4.146	4.804E+01	3.71E+00	68.249	0.00	U
0.688	4.964	5.147E+01	4.79E+00	69.994	0.00	U
0.828	6.577	5.428E+01	5.99E+00	77.463	0.39	U
1.016	9.298	5.557E+01	7.39E+00	86.026	1.42	U
1.223	12.380	5.640E+01	9.37E+00	89.634	2.84	U
1.412	15.098	5.733E+01	1.22E+01	90.119	3.85	U
1.588	17.560	5.843E+01	1.53E+01	89.737	4.55	U
1.777	20.193	5.972E+01	1.89E+01	89.424	5.17	U
1.981	23.029	6.127E+01	2.36E+01	89.248	5.63	U
2.183	25.827	6.293E+01	2.90E+01	89.105	6.02	U
2.392	28.704	6.473E+01	3.54E+01	89.041	6.37	U
2.622	31.889	6.682E+01	4.36E+01	89.012	6.73	U
2.815	34.518	6.863E+01	5.15E+01	89.020	7.01	U
3.018	37.315	7.058E+01	6.06E+01	89.076	7.27	U
3.233	40.273	7.268E+01	7.12E+01	89.145	7.54	U
3.447	43.208	7.479E+01	8.29E+01	89.235	7.80	U
3.674	46.330	7.706E+01	9.64E+01	89.333	8.07	U
3.914	49.631	7.946E+01	1.12E+02	89.456	8.36	U
4.148	52.842	8.191E+01	1.30E+02	89.548	8.60	U
4.395	56.229	8.450E+01	1.50E+02	89.634	8.87	U
4.604	59.065	8.674E+01	1.68E+02	89.755	9.05	U
4.815	61.954	8.904E+01	1.89E+02	89.853	9.26	U
5.011	64.627	9.118E+01	2.09E+02	89.960	9.45	U
5.219	67.485	9.344E+01	2.31E+02	90.085	9.65	U
5.432	70.407	9.574E+01	2.55E+02	90.213	9.86	U
5.613	72.858	9.761E+01	2.77E+02	90.366	10.04	U
5.824	75.789	9.983E+01	3.02E+02	90.496	10.26	U
6.019	78.447	1.018E+02	3.27E+02	90.604	10.46	U

6.373	83.254	1.060E+02	3.85E+02	90.660	10.82	U
6.526	85.302	1.082E+02	4.14E+02	90.529	10.97	U
6.662	87.121	1.102E+02	4.40E+02	90.565	11.11	U
6.805	89.062	1.123E+02	4.68E+02	90.693	11.27	U
6.929	90.716	1.140E+02	4.94E+02	90.820	11.42	U
7.042	92.236	1.157E+02	5.20E+02	90.872	11.54	U
7.161	93.845	1.172E+02	5.43E+02	90.995	11.70	U
7.260	95.167	1.185E+02	5.65E+02	91.117	11.82	U
7.344	96.223	1.202E+02	5.97E+02	90.944	11.94	U
7.425	97.317	1.222E+02	6.30E+02	90.716	12.02	U
7.513	98.408	1.248E+02	6.73E+02	90.567	12.11	U
7.587	98.961	1.298E+02	7.85E+02	89.698	12.24	U
7.629	99.402	1.333E+02	8.56E+02	88.678	12.20	U

Volume especificado cheio sob controlo de velocidade. A comutar para controlo de pressão.

7.654	99.504	1.354E+02	8.96E+02	88.513	12.19	U/P
7.659	99.542	9.772E+01	8.93E+02	-35.367	12.16	P
7.664	99.581	6.000E+01	8.81E+02	-293.569	12.17	P
7.677	99.685	6.000E+01	8.42E+02	-248.160	12.22	P
7.712	99.934	6.000E+01	7.87E+02	-39.112	12.39	P
7.728	100.000	6.000E+01	8.24E+02	-9.719	12.54	Cheio

Tabela A6 - Resultados para a etapa de compactação obtidos na simulação do processo de injeção relativo à proposta 1.

Análise de Compactação

Tempo (s)	Compact. (%)	Pr. de inj. (MPa)	F de fecho (tonelada)	M. da peça (g)	Congel. Vol (%)	Estado
7.757	0.06	6.000E+01	8.14E+02	6.27E+02	12.76	P
7.806	0.17	6.000E+01	8.03E+02	6.27E+02	12.90	P
7.928	0.43	6.000E+01	7.85E+02	6.27E+02	13.30	P
8.177	0.96	6.000E+01	7.57E+02	6.27E+02	14.08	P
8.683	2.03	6.000E+01	7.13E+02	6.27E+02	15.68	P
9.728	4.26	6.000E+01	6.36E+02	6.29E+02	18.81	P
11.071	7.12	6.000E+01	5.39E+02	6.30E+02	22.88	P
12.705	10.61	6.000E+01	4.15E+02	6.31E+02	28.26	P
14.223	13.84	6.000E+01	3.02E+02	6.32E+02	33.65	P
15.631	16.84	6.000E+01	2.12E+02	6.32E+02	39.13	P
16.915	19.58	6.000E+01	1.52E+02	6.33E+02	44.73	P
17.654	21.15	6.000E+01	1.22E+02	6.33E+02	48.36	P
18.034	21.96	4.858E+01	1.03E+02	6.33E+02	50.38	P
18.486	22.93	3.504E+01	8.27E+01	6.33E+02	52.76	P
18.937	23.89	2.150E+01	6.37E+01	6.33E+02	55.32	P
19.389	24.85	7.953E+00	4.59E+01	6.33E+02	58.15	P
19.654	25.41	0.000E+00	3.62E+01	6.33E+02	60.03	P
20.031	26.22	0.000E+00	2.66E+01	6.33E+02	62.80	P
20.498	27.21	0.000E+00	1.74E+01	6.33E+02	66.50	P
21.130	28.56	0.000E+00	8.54E+00	6.33E+02	71.67	P
21.741	29.86	0.000E+00	3.60E+00	6.33E+02	76.42	P
22.374	31.21	0.000E+00	1.13E+00	6.33E+02	80.99	P
23.065	32.68	0.000E+00	8.68E-01	6.33E+02	85.48	P
23.836	34.33	0.000E+00	6.16E-01	6.33E+02	89.73	P
24.743	36.26	0.000E+00	3.50E-01	6.33E+02	93.96	P
25.814	38.54	0.000E+00	1.03E-01	6.33E+02	98.18	P
27.084	41.25	0.000E+00	1.65E-02	6.33E+02	99.85	P
28.745	44.79	0.000E+00	5.16E-03	6.33E+02	99.97	P
30.580	48.70	0.000E+00	2.05E-03	6.33E+02	100.00	P
32.580	52.96	0.000E+00	6.97E-04	6.33E+02	100.00	P
34.580	57.22	0.000E+00	2.73E-04	6.33E+02	100.00	P
36.580	61.49	0.000E+00	9.25E-05	6.33E+02	100.00	P
38.580	65.75	0.000E+00	1.30E-05	6.33E+02	100.00	P
40.580	70.01	0.000E+00	0.00E+00	6.33E+02	100.00	P
42.580	74.27	0.000E+00	0.00E+00	6.33E+02	100.00	P
44.580	78.53	0.000E+00	0.00E+00	6.33E+02	100.00	P
46.580	82.80	0.000E+00	0.00E+00	6.33E+02	100.00	P
48.580	87.06	0.000E+00	0.00E+00	6.33E+02	100.00	P
50.580	91.32	0.000E+00	0.00E+00	6.33E+02	100.00	P
52.580	95.58	0.000E+00	0.00E+00	6.33E+02	100.00	P
54.239	99.12	0.000E+00	0.00E+00	6.33E+02	100.00	P
54.654	100.00	0.000E+00	0.00E+00	6.33E+02	100.00	P

Tabela A7 - Resultados para a etapa de enchimento obtidos na simulação do processo de injeção relativo à proposta 2.

Fase de enchimento: Estado: U = Controlo de velocidade
 U/P = Comutação velocidade/pressão
 P = Controlo de pressão

Tempo (s)	Vol ench. (%)	Pr. de inj. (MPa)	F de fecho (tonelada)	Caudal (cm ³ /s)	Congel. Vol (%)	Estado
0.045	0.107	5.559E+00	1.85E-04	7.025	0.00	U
0.124	0.119	1.490E+01	1.32E-03	11.131	0.00	U
0.279	0.377	2.946E+01	1.06E-02	26.209	0.00	U
0.290	0.855	3.052E+01	7.44E-02	38.562	0.00	U
0.320	1.080	3.297E+01	1.17E-01	44.332	0.00	U
0.383	1.568	3.699E+01	3.00E-01	53.680	0.00	U
0.440	2.138	3.997E+01	5.86E-01	62.177	0.00	U
0.492	2.702	4.209E+01	9.31E-01	68.829	0.00	U
0.522	3.075	4.325E+01	1.33E+00	72.622	0.00	U
0.525	3.096	4.336E+01	1.37E+00	73.614	0.00	U
0.533	3.179	4.367E+01	1.72E+00	73.384	0.00	U
0.535	3.188	4.374E+01	1.84E+00	72.610	0.00	U
0.540	3.255	4.398E+01	2.16E+00	72.135	0.00	U
0.555	3.417	4.478E+01	3.10E+00	69.275	0.00	U
0.560	3.426	4.508E+01	3.01E+00	65.134	0.00	U
0.567	3.483	4.546E+01	2.95E+00	63.554	0.00	U
0.590	3.707	4.698E+01	3.78E+00	62.607	0.00	U
0.670	4.459	5.160E+01	5.01E+00	63.453	0.00	U
0.824	6.027	5.511E+01	5.95E+00	73.624	0.13	U
0.973	8.352	5.730E+01	7.52E+00	83.988	1.11	U
1.134	10.587	5.872E+01	9.33E+00	87.234	2.34	U
1.340	13.521	5.943E+01	1.13E+01	89.713	3.41	U
1.588	17.138	5.991E+01	1.46E+01	91.194	4.38	U
1.768	19.718	6.047E+01	1.82E+01	91.302	4.89	U
1.950	22.293	6.141E+01	2.22E+01	90.730	5.30	U
2.107	24.462	6.252E+01	2.63E+01	90.054	5.68	U
2.313	27.331	6.415E+01	3.19E+01	89.628	6.08	U
2.524	30.233	6.597E+01	3.88E+01	89.447	6.48	U
2.744	33.260	6.800E+01	4.72E+01	89.349	6.83	U
2.948	36.040	6.997E+01	5.62E+01	89.321	7.11	U
3.163	38.984	7.209E+01	6.65E+01	89.355	7.38	U
3.372	41.833	7.416E+01	7.74E+01	89.450	7.63	U
3.584	44.737	7.628E+01	8.96E+01	89.571	7.88	U
3.802	47.728	7.848E+01	1.03E+02	89.683	8.14	U
4.042	51.019	8.089E+01	1.20E+02	89.803	8.43	U
4.281	54.291	8.335E+01	1.39E+02	89.923	8.67	U
4.511	57.422	8.582E+01	1.58E+02	89.993	8.89	U
4.710	60.112	8.801E+01	1.77E+02	90.056	9.08	U
4.913	62.884	9.026E+01	1.97E+02	90.158	9.29	U
5.123	65.760	9.259E+01	2.20E+02	90.279	9.49	U
5.325	68.495	9.477E+01	2.42E+02	90.422	9.68	U
5.516	71.098	9.678E+01	2.65E+02	90.583	9.87	U
5.703	73.656	9.869E+01	2.87E+02	90.738	10.04	U
5.909	76.505	1.008E+02	3.12E+02	90.853	10.26	U
6.088	78.927	1.027E+02	3.36E+02	90.953	10.44	U
6.212	80.575	1.039E+02	3.54E+02	91.053	10.56	U
6.248	80.987	1.043E+02	3.59E+02	91.114	10.60	U
6.380	82.895	1.058E+02	3.83E+02	91.087	10.73	U
6.534	84.978	1.077E+02	4.08E+02	91.046	10.92	U

	6.679		86.942		1.096E+02		4.33E+02		91.064		11.10		U	
	6.809		88.692		1.113E+02		4.57E+02		91.108		11.25		U	
	6.933		90.355		1.128E+02		4.80E+02		91.192		11.39		U	
	7.058		92.063		1.144E+02		5.04E+02		91.285		11.54		U	
	7.141		93.140		1.154E+02		5.19E+02		91.382		11.63		U	
Abrir grupo do ataque com válvula: Valve gate controller defaults														
	7.150		93.202		7.945E+01		4.91E+02		236.608		11.67		U	
	7.151		93.240		7.462E+01		4.86E+02		429.434		11.70		U	
	7.152		93.555		7.082E+01		4.82E+02		426.332		11.71		U	
	7.154		93.972		6.939E+01		4.78E+02		264.677		11.69		U	
	7.157		94.059		7.029E+01		4.70E+02		112.002		11.70		U	
	7.163		94.212		7.318E+01		4.57E+02		61.171		11.72		U	
	7.173		94.470		7.772E+01		4.41E+02		54.549		11.74		U	
	7.191		94.863		8.364E+01		4.28E+02		61.923		11.79		U	
	7.242		95.465		9.346E+01		4.40E+02		72.567		11.95		U	
	7.318		96.302		9.814E+01		4.93E+02		83.173		12.16		U	
	7.375		96.924		9.998E+01		5.25E+02		89.137		12.24		U	
	7.439		97.709		1.019E+02		5.59E+02		90.341		12.36		U	
	7.489		98.257		1.034E+02		5.85E+02		90.509		12.43		U	
	7.535		98.799		1.050E+02		6.11E+02		90.467		12.50		U	
	7.574		99.234		1.065E+02		6.35E+02		90.304		12.56		U	

Volume especificado cheio sob controle de velocidade. A comutar para controle de pressão.

	7.602		99.505		1.077E+02		6.54E+02		90.156		12.60		U/P	
	7.607		99.569		8.383E+01		6.53E+02		3.859		12.60		P	
	7.612		99.618		6.000E+01		6.51E+02		-165.132		12.61		P	
	7.629		99.727		6.000E+01		6.48E+02		-145.881		12.67		P	
	7.686		99.848		6.000E+01		6.31E+02		-22.454		12.92		P	
	7.789		99.999		6.000E+01		6.25E+02		1.096		13.47		P	
	7.872		100.000		6.000E+01		6.33E+02		3.214		14.08		Cheio	

Tabela A8 - Resultados para a etapa de compactação obtidos na simulação do processo de injeção relativo à proposta 2.

Análise de Compactação

Tempo (s)	Compact. (%)	Pr. de inj. (MPa)	F de fecho (tonelada)	M. da peça (g)	Congel. Vol (%)	Estad
8.614	1.59	6.000E+01	6.19E+02	6.23E+02	16.57	P
9.912	4.37	6.000E+01	5.62E+02	6.26E+02	19.67	P
11.614	8.01	6.000E+01	4.75E+02	6.28E+02	24.89	P
13.244	11.50	6.000E+01	3.83E+02	6.30E+02	30.17	P
14.788	14.80	6.000E+01	3.09E+02	6.31E+02	35.73	P
16.176	17.77	6.000E+01	2.55E+02	6.32E+02	41.13	P
17.602	20.82	6.000E+01	2.13E+02	6.33E+02	47.33	P
17.924	21.51	5.033E+01	1.90E+02	6.33E+02	49.08	P
18.283	22.28	3.957E+01	1.66E+02	6.33E+02	50.98	P
18.642	23.05	2.880E+01	1.42E+02	6.33E+02	52.96	P
19.000	23.81	1.803E+01	1.18E+02	6.33E+02	55.09	P
19.359	24.58	7.266E+00	9.45E+01	6.33E+02	57.39	P
19.602	25.10	0.000E+00	7.80E+01	6.33E+02	59.13	P
19.972	25.89	0.000E+00	5.84E+01	6.33E+02	61.87	P
20.435	26.89	0.000E+00	3.73E+01	6.33E+02	65.57	P
20.986	28.06	0.000E+00	1.75E+01	6.33E+02	70.29	P
21.563	29.30	0.000E+00	5.89E+00	6.33E+02	75.19	P
22.151	30.56	0.000E+00	1.68E+00	6.33E+02	79.68	P
22.806	31.96	0.000E+00	1.14E+00	6.33E+02	84.02	P
23.527	33.50	0.000E+00	9.28E-01	6.33E+02	88.25	P
24.298	35.15	0.000E+00	7.13E-01	6.33E+02	92.44	P
25.112	36.89	0.000E+00	5.54E-01	6.33E+02	96.32	P
25.972	38.73	0.000E+00	4.45E-01	6.33E+02	98.92	P
27.043	41.03	0.000E+00	3.57E-01	6.33E+02	99.62	P
28.282	43.68	0.000E+00	2.52E-01	6.33E+02	99.80	P
Fechar grupo do ataque com válvula: Valve gate controller defaults						
30.000	47.35	0.000E+00	1.69E-01	6.33E+02	99.95	P
31.795	51.19	0.000E+00	1.04E-01	6.33E+02	99.99	P
33.795	55.47	0.000E+00	6.12E-02	6.33E+02	100.00	P
35.795	59.75	0.000E+00	3.11E-02	6.33E+02	100.00	P
37.795	64.03	0.000E+00	1.18E-02	6.33E+02	100.00	P
39.795	68.31	0.000E+00	3.55E-03	6.33E+02	100.00	P
41.795	72.59	0.000E+00	9.26E-04	6.33E+02	100.00	P
43.795	76.87	0.000E+00	1.85E-04	6.33E+02	100.00	P
45.795	81.15	0.000E+00	2.36E-05	6.33E+02	100.00	P
47.795	85.43	0.000E+00	1.86E-05	6.33E+02	100.00	P
49.795	89.71	0.000E+00	1.51E-05	6.33E+02	100.00	P
51.795	93.99	0.000E+00	1.20E-05	6.33E+02	100.00	P
53.795	98.27	0.000E+00	9.32E-06	6.33E+02	100.00	P
54.602	100.00	0.000E+00	1.02E-05	6.33E+02	100.00	P

Tabela A9 - Resultados para a etapa de enchimento obtidos na simulação do processo de injeção relativo à proposta 3.

Fase de enchimento: Estado: U = Controlo de velocidade
 ===== U/P = Comutação velocidade/pressão
 P = Controlo de pressão

Tempo (s)	Vol ench. (%)	Pr. de inj. (MPa)	F de fecho (tonelada)	Caudal (cm ³ /s)	Congel. Vol (%)	Estado
0.044	0.105	5.099E+00	4.86E-04	9.613	0.00	U
0.121	0.138	1.279E+01	2.28E-03	17.609	0.00	U
0.265	0.724	2.251E+01	6.28E-02	38.237	0.00	U
0.282	1.248	2.365E+01	1.70E-01	51.945	0.00	U
0.336	1.692	2.647E+01	3.55E-01	57.667	0.00	U
0.389	2.215	2.902E+01	6.22E-01	64.219	0.00	U
0.437	2.680	3.100E+01	9.55E-01	68.086	0.00	U
0.486	3.193	3.276E+01	1.35E+00	71.733	0.00	U
0.516	3.494	3.393E+01	1.97E+00	72.752	0.00	U
0.523	3.558	3.419E+01	2.08E+00	72.344	0.00	U
0.530	3.627	3.448E+01	2.58E+00	72.194	0.00	U
0.532	3.641	3.455E+01	2.72E+00	71.611	0.00	U
0.538	3.697	3.480E+01	3.30E+00	70.180	0.00	U
0.541	3.714	3.501E+01	3.29E+00	66.779	0.00	U
0.552	3.812	3.561E+01	3.80E+00	63.633	0.00	U
0.584	4.105	3.758E+01	4.50E+00	61.967	0.00	U
0.692	5.075	4.258E+01	5.84E+00	65.408	0.03	U
0.837	6.668	4.630E+01	7.07E+00	75.031	0.47	U
0.990	8.759	4.836E+01	8.67E+00	83.642	1.49	U
1.143	10.932	4.970E+01	1.04E+01	87.903	2.49	U
1.366	14.065	5.093E+01	1.27E+01	89.849	3.64	U
1.599	17.358	5.202E+01	1.61E+01	90.841	4.49	U
1.769	19.717	5.297E+01	1.97E+01	90.914	4.92	U
1.929	21.931	5.401E+01	2.35E+01	90.624	5.25	U
2.114	24.478	5.532E+01	2.79E+01	90.392	5.60	U
2.295	26.962	5.672E+01	3.31E+01	90.231	5.95	U
2.513	29.957	5.850E+01	4.00E+01	90.128	6.36	U
2.719	32.762	6.030E+01	4.78E+01	90.075	6.67	U
2.904	35.255	6.198E+01	5.56E+01	90.046	6.93	U
3.086	37.723	6.366E+01	6.42E+01	90.082	7.14	U
3.291	40.511	6.556E+01	7.43E+01	90.163	7.39	U
3.480	43.063	6.736E+01	8.48E+01	90.237	7.62	U
3.719	46.340	6.976E+01	9.90E+01	90.266	7.90	U
3.955	49.517	7.220E+01	1.15E+02	90.291	8.17	U
4.165	52.328	7.439E+01	1.30E+02	90.388	8.38	U
4.379	55.225	7.666E+01	1.48E+02	90.510	8.58	U
4.590	58.077	7.891E+01	1.66E+02	90.623	8.78	U
4.796	60.851	8.113E+01	1.86E+02	90.737	8.98	U
5.011	63.755	8.351E+01	2.08E+02	90.831	9.19	U
5.221	66.583	8.593E+01	2.31E+02	90.898	9.39	U
5.437	69.488	8.826E+01	2.57E+02	91.059	9.60	U
5.627	72.046	9.023E+01	2.78E+02	91.289	9.79	U
5.826	74.763	9.227E+01	3.02E+02	91.449	9.97	U
6.028	77.499	9.438E+01	3.28E+02	91.550	10.17	U
6.114	78.572	9.529E+01	3.39E+02	91.640	10.26	U
6.157	79.118	9.571E+01	3.45E+02	91.755	10.29	U
6.235	80.190	9.656E+01	3.62E+02	91.755	10.37	U
6.247	80.278	9.669E+01	3.64E+02	91.731	10.39	U
6.290	80.898	9.715E+01	3.70E+02	91.774	10.41	U

6.445	83.106	9.888E+01	3.93E+02	91.768	10.59	U
6.604	85.234	1.009E+02	4.20E+02	91.704	10.81	U
6.732	86.908	1.027E+02	4.44E+02	91.647	10.97	U
6.866	88.698	1.046E+02	4.70E+02	91.678	11.12	U
6.993	90.390	1.063E+02	4.94E+02	91.786	11.27	U
7.122	92.109	1.081E+02	5.21E+02	91.905	11.41	U
7.148	92.347	1.084E+02	5.24E+02	92.025	11.45	U
Abrir grupo do ataque com válvula: Valve gate controller defaults						
7.150	92.363	9.161E+01	5.20E+02	386.079	11.47	U
7.151	92.399	8.396E+01	5.17E+02	711.661	11.48	U
7.152	92.693	8.044E+01	5.13E+02	571.532	11.48	U
7.154	93.117	7.907E+01	5.11E+02	281.013	11.47	U
7.157	93.199	7.977E+01	5.05E+02	117.595	11.47	U
7.162	93.346	8.190E+01	4.95E+02	65.660	11.48	U
7.177	93.604	8.555E+01	4.77E+02	64.804	11.51	U
7.235	94.310	9.164E+01	4.71E+02	77.827	11.67	U
7.290	95.058	9.437E+01	4.95E+02	86.806	11.82	U
7.352	95.811	9.616E+01	5.25E+02	90.045	11.95	U
7.428	96.746	9.816E+01	5.57E+02	91.032	12.08	U
7.499	97.589	1.000E+02	5.87E+02	91.253	12.20	U
7.567	98.401	1.016E+02	6.17E+02	91.426	12.30	U
Abrir grupo do ataque com válvula: Valve gate controller defaults						

Volume especificado cheio sob controle de velocidade. A comutar para controle de pressão.

7.620	99.006	6.491E+01	5.43E+02	115.468	12.42	U/P
7.621	99.088	6.442E+01	5.37E+02	229.401	12.54	P
7.623	99.303	6.356E+01	5.35E+02	248.093	12.53	P
7.626	99.331	6.206E+01	5.33E+02	127.652	12.54	P
7.628	99.354	6.103E+01	5.32E+02	56.038	12.55	P
7.629	99.366	6.051E+01	5.31E+02	25.184	12.56	P
7.630	99.372	6.000E+01	5.30E+02	12.813	12.56	P
7.632	99.388	6.000E+01	5.29E+02	9.039	12.57	P
7.635	99.416	6.000E+01	5.27E+02	9.002	12.58	P
7.641	99.455	6.000E+01	5.25E+02	9.466	12.61	P
7.651	99.521	6.000E+01	5.22E+02	11.323	12.65	P
7.668	99.630	6.000E+01	5.19E+02	13.464	12.72	P
7.698	99.801	6.000E+01	5.15E+02	15.106	12.84	P
7.739	99.999	6.000E+01	5.25E+02	15.675	13.01	P
7.740	100.000	6.000E+01	5.32E+02	15.605	13.04	Cheio

Tabela A10 - Resultados para a etapa de enchimento obtidos na simulação do processo de injeção relativo à proposta 3.

Análise de Compactação						
Tempo (s)	Compact. (%)	Pr. de inj. (MPa)	F de fecho (tonelada)	M. da peça (g)	Congel. Vol (%)	Estado
7.741	0.00	6.000E+01	5.33E+02	6.20E+02	13.04	P
7.745	0.01	6.000E+01	5.35E+02	6.20E+02	13.05	P
7.761	0.04	6.000E+01	5.40E+02	6.20E+02	13.11	P
7.824	0.18	6.000E+01	5.59E+02	6.20E+02	13.31	P
7.922	0.39	6.000E+01	5.82E+02	6.21E+02	13.51	P
8.057	0.68	6.000E+01	6.02E+02	6.22E+02	13.85	P
8.284	1.16	6.000E+01	6.19E+02	6.23E+02	14.52	P
8.801	2.26	6.000E+01	6.30E+02	6.25E+02	16.09	P
10.208	5.27	6.000E+01	6.01E+02	6.28E+02	20.01	P
11.877	8.83	6.000E+01	5.31E+02	6.30E+02	25.26	P
13.373	12.02	6.000E+01	4.59E+02	6.32E+02	29.84	P
14.786	15.03	6.000E+01	3.95E+02	6.33E+02	34.69	P
16.244	18.14	6.000E+01	3.40E+02	6.35E+02	40.28	P
17.620	21.08	6.000E+01	2.93E+02	6.36E+02	46.29	P
17.815	21.49	5.415E+01	2.72E+02	6.36E+02	47.45	P
18.032	21.95	4.766E+01	2.54E+02	6.36E+02	48.61	P
18.248	22.42	4.117E+01	2.37E+02	6.36E+02	49.77	P
18.464	22.88	3.470E+01	2.21E+02	6.36E+02	50.96	P
18.680	23.34	2.822E+01	2.04E+02	6.36E+02	52.18	P
18.896	23.80	2.173E+01	1.87E+02	6.36E+02	53.44	P
19.113	24.26	1.523E+01	1.70E+02	6.36E+02	54.75	P
19.329	24.72	8.742E+00	1.53E+02	6.36E+02	56.11	P
19.545	25.18	2.251E+00	1.36E+02	6.36E+02	57.53	P
19.620	25.34	0.000E+00	1.28E+02	6.36E+02	58.11	P
19.876	25.89	0.000E+00	1.12E+02	6.36E+02	59.83	P
20.410	27.03	0.000E+00	8.14E+01	6.36E+02	63.72	P
20.999	28.28	0.000E+00	4.96E+01	6.36E+02	68.68	P
21.594	29.55	0.000E+00	2.39E+01	6.36E+02	74.11	P
22.142	30.72	0.000E+00	8.19E+00	6.36E+02	78.88	P
22.717	31.95	0.000E+00	1.72E+00	6.36E+02	83.30	P
23.367	33.33	0.000E+00	1.22E+00	6.36E+02	87.56	P
24.129	34.96	0.000E+00	9.29E-01	6.36E+02	91.86	P
25.015	36.85	0.000E+00	6.80E-01	6.36E+02	96.09	P
25.971	38.89	0.000E+00	5.18E-01	6.36E+02	98.94	P
26.990	41.06	0.000E+00	4.00E-01	6.36E+02	99.57	P
28.142	43.52	0.000E+00	1.85E-01	6.36E+02	99.77	P
29.524	46.47	0.000E+00	1.15E-01	6.36E+02	99.90	P
Fechar grupo do ataque com válvula: Valve gate controller defaults						
30.000	47.48	0.000E+00	9.62E-02	6.36E+02	99.93	P
31.404	50.48	0.000E+00	7.12E-02	6.36E+02	99.98	P
33.404	54.74	0.000E+00	1.64E-02	6.36E+02	99.99	P
35.404	59.01	0.000E+00	4.00E-03	6.36E+02	100.00	P
37.404	63.28	0.000E+00	1.14E-03	6.36E+02	100.00	P
39.404	67.54	0.000E+00	4.47E-04	6.36E+02	100.00	P
41.404	71.81	0.000E+00	2.20E-04	6.36E+02	100.00	P
43.404	76.07	0.000E+00	1.56E-04	6.36E+02	100.00	P
45.404	80.34	0.000E+00	1.35E-04	6.36E+02	100.00	P
47.404	84.61	0.000E+00	1.16E-04	6.36E+02	100.00	P
49.404	88.87	0.000E+00	9.98E-05	6.36E+02	100.00	P
51.404	93.14	0.000E+00	8.53E-05	6.36E+02	100.00	P
53.404	97.41	0.000E+00	7.29E-05	6.36E+02	100.00	P
54.620	100.00	0.000E+00	6.76E-05	6.36E+02	100.00	P